

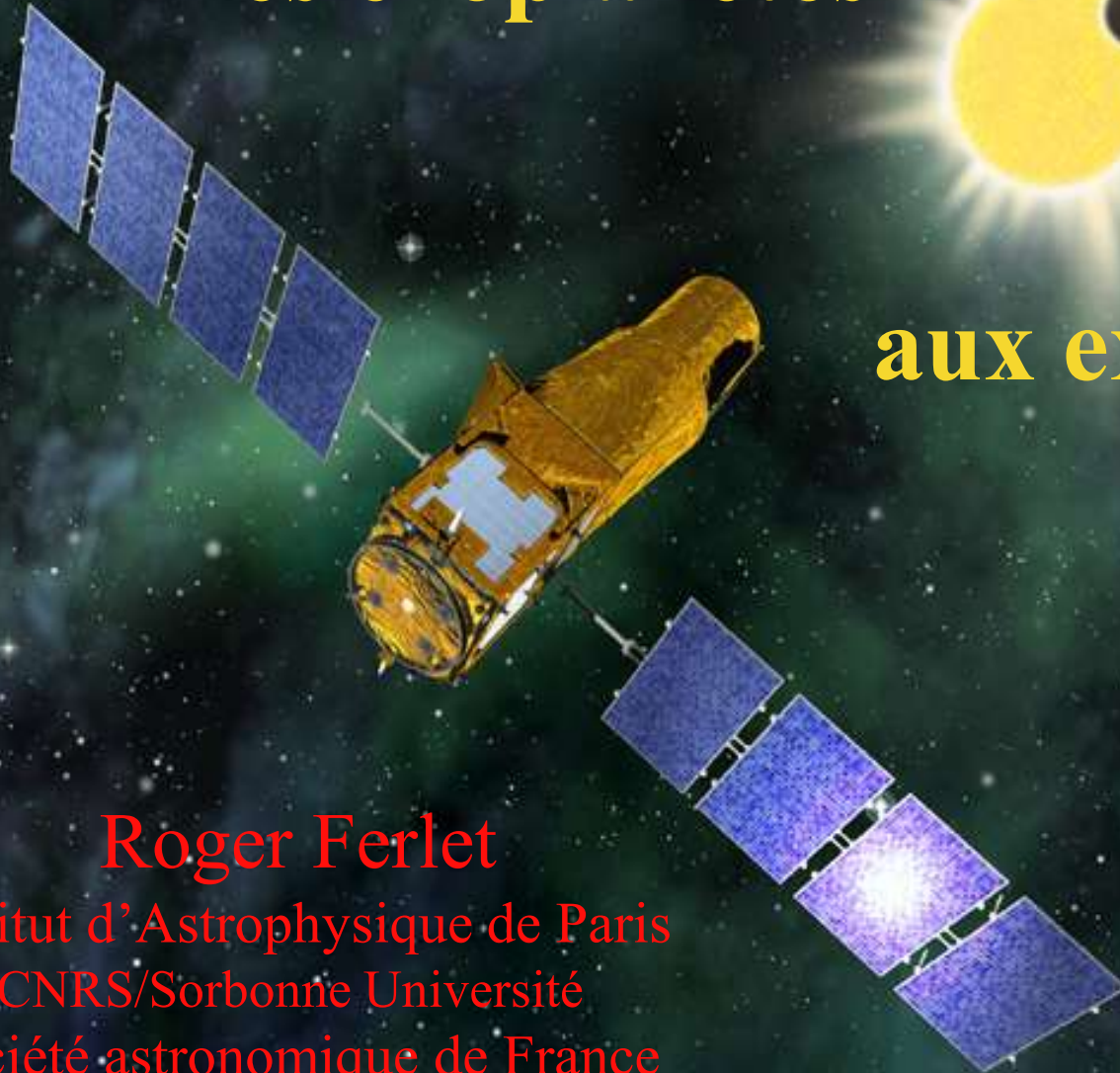
# Des exoplanètes

# aux exocomètes

**Roger Ferlet**

Institut d'Astrophysique de Paris  
CNRS/Sorbonne Université  
Société astronomique de France

Montgeron  
5 octobre 2024



En une année :

la Lune s'éloigne de la Terre de 3,8 cm

la masse du Soleil perd 174 000 milliards de tonnes  
et donc l'orbite de la Terre augmente de 1,5 cm  
(4 millions de tonnes/sec)

150 milliards d'étoiles se forment dans l'Univers

la galaxie d'Andromède se rapproche de la Terre  
de 3,5 milliards de km

l'Univers, en expansion, augmente de plus de 60 000  
milliards de km



# La méthode scientifique

## Astronomie = science d'observation

*Comme toute science, elle se construit avec des faits,  
de même qu'une maison se construit avec des pierres.*

*Progrès techniques énormes → faits observationnels nouveaux.*

## Mais

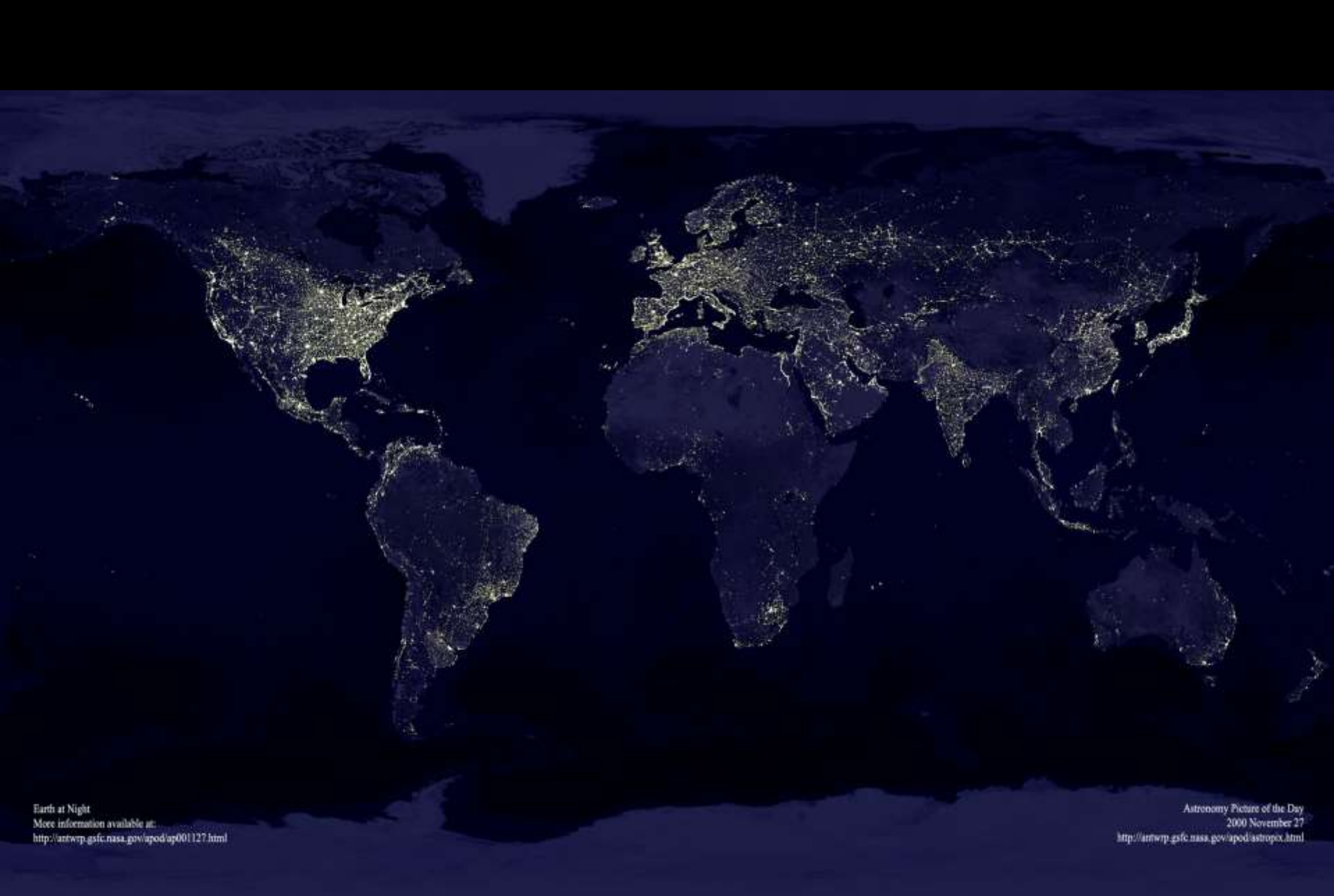
*une simple accumulation de faits ne suffit pas,  
tout comme un tas de pierres ne fait pas une maison!*

**Il faut aussi modéliser, construire une théorie  
capable de faire des prédictions, puis retourner aux faits**

**La science est une aventure humaine et collective, pas une activité solitaire et nationale**

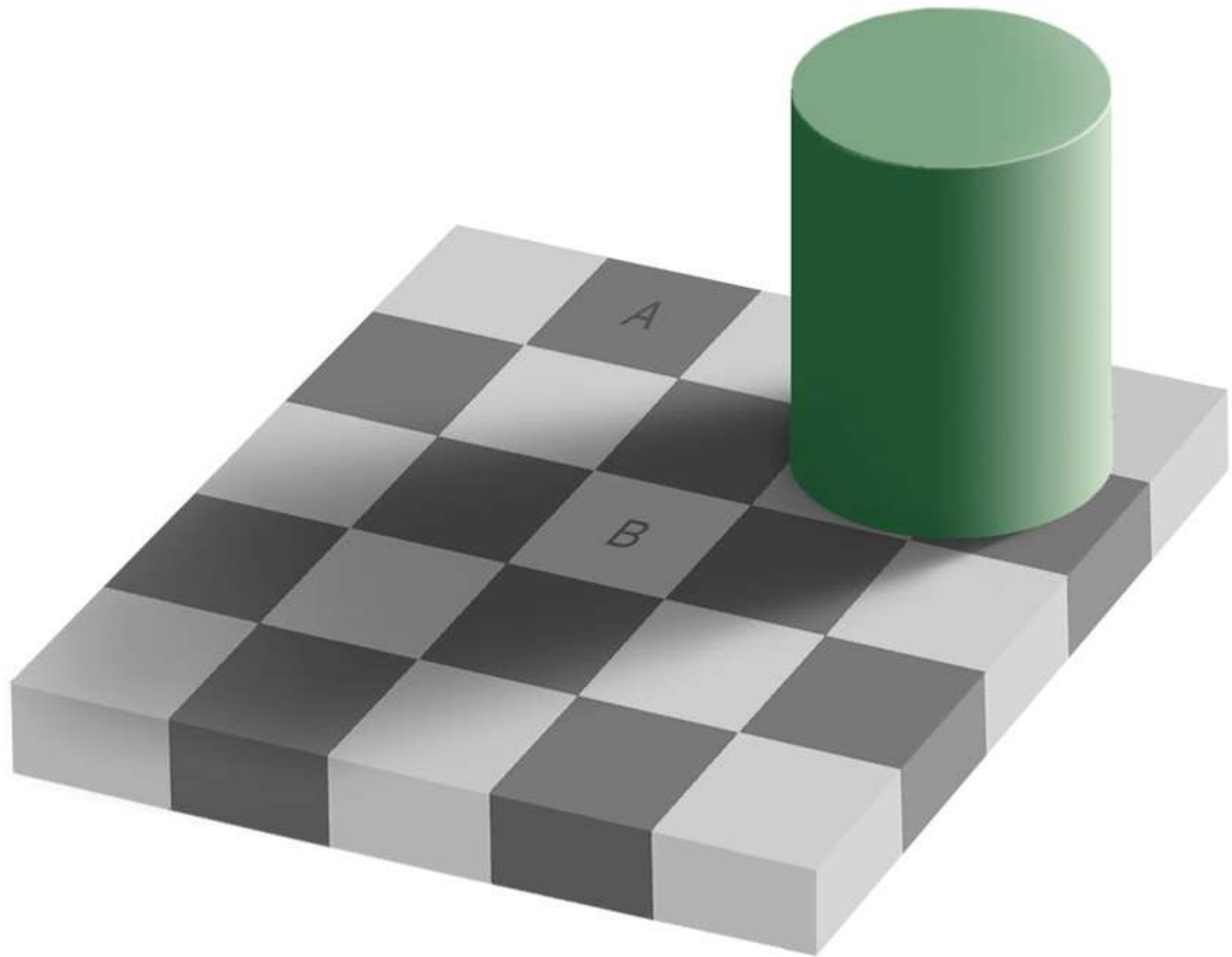


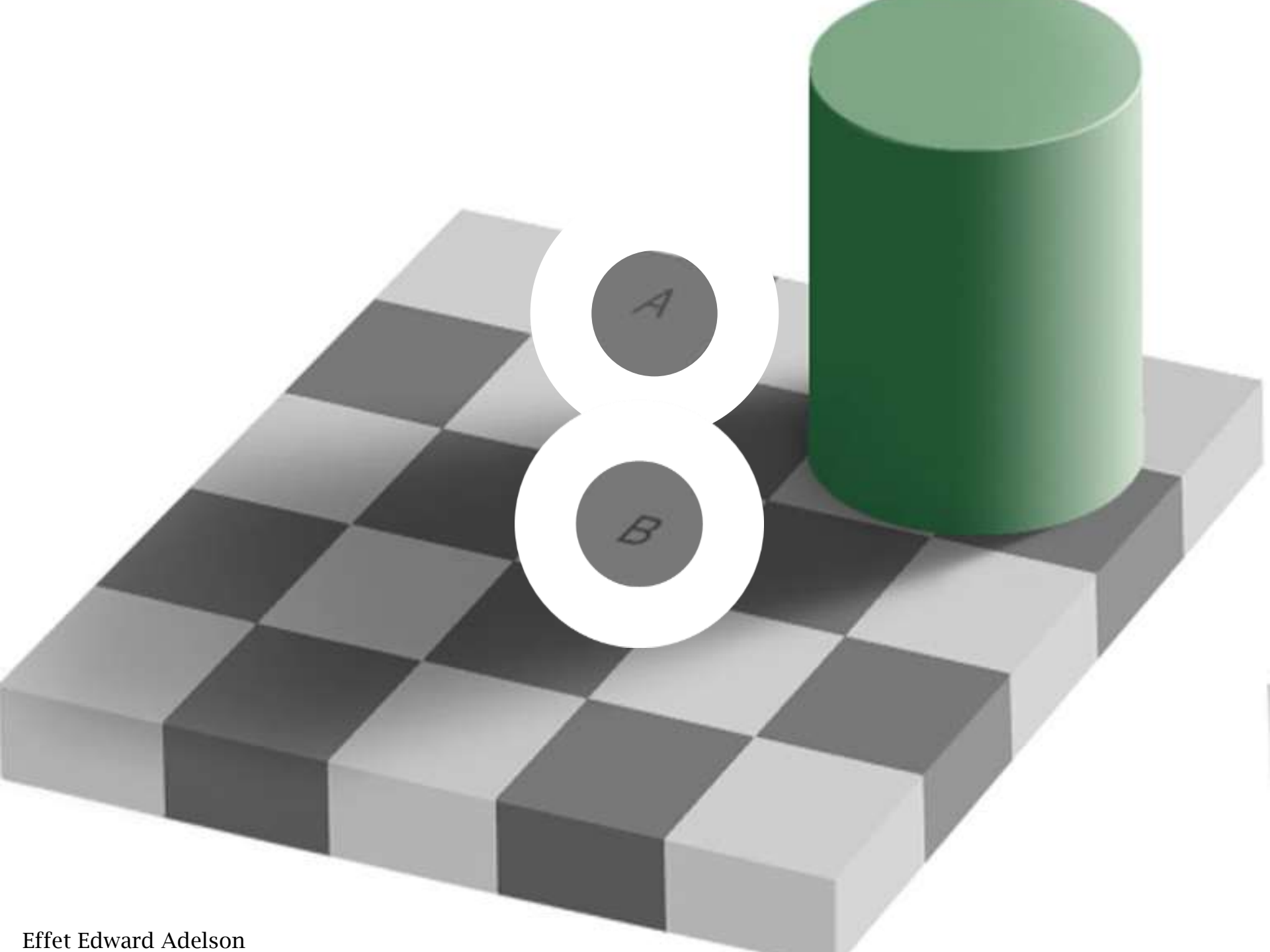




Earth at Night  
More information available at:  
<http://aerwp.gsfc.nasa.gov/apod/ap001127.html>

Astronomy Picture of the Day  
2000 November 27  
<http://aerwp.gsfc.nasa.gov/apod/astropic.html>





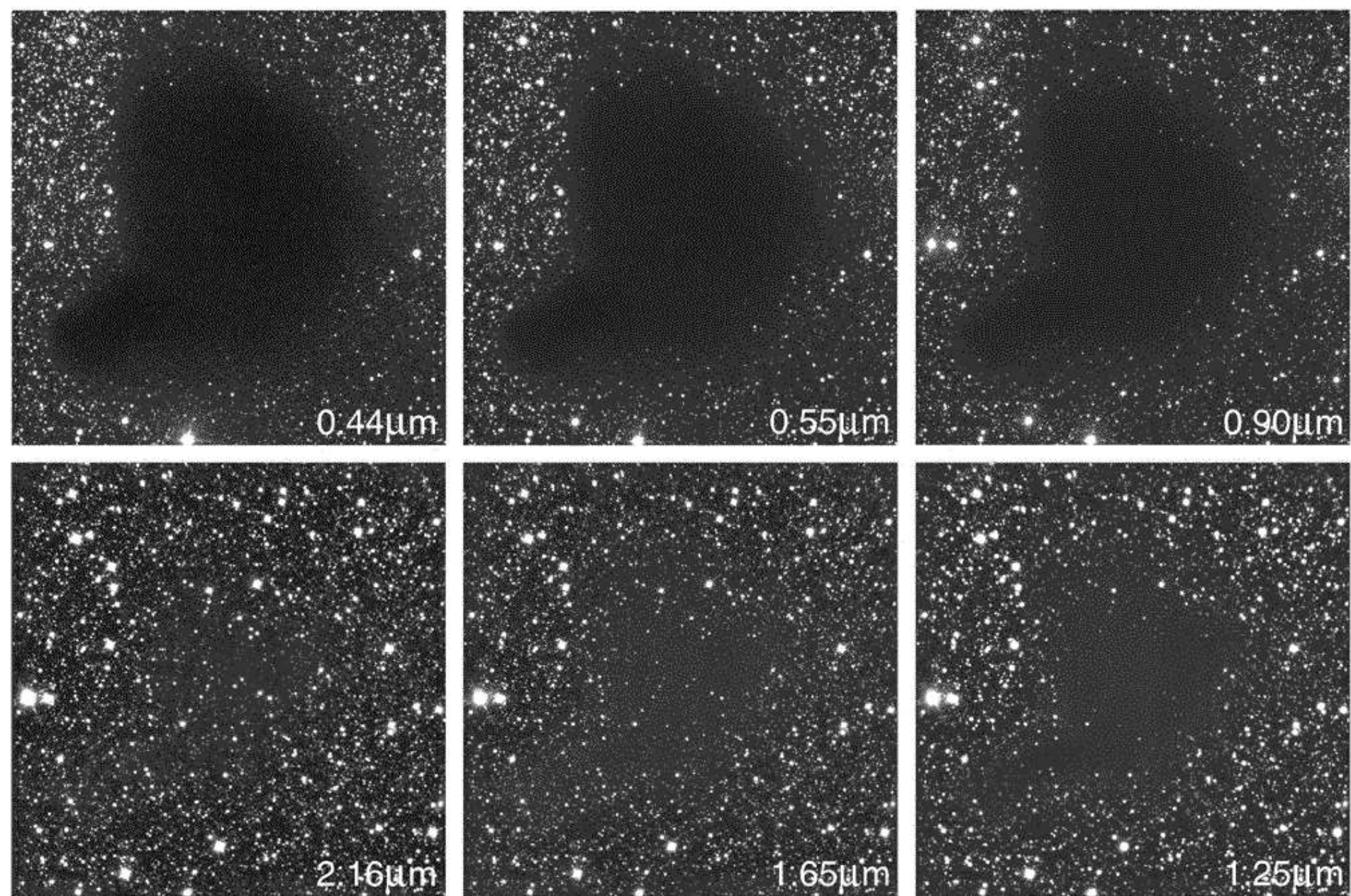
Effet Edward Adelson



# Formation des planètes

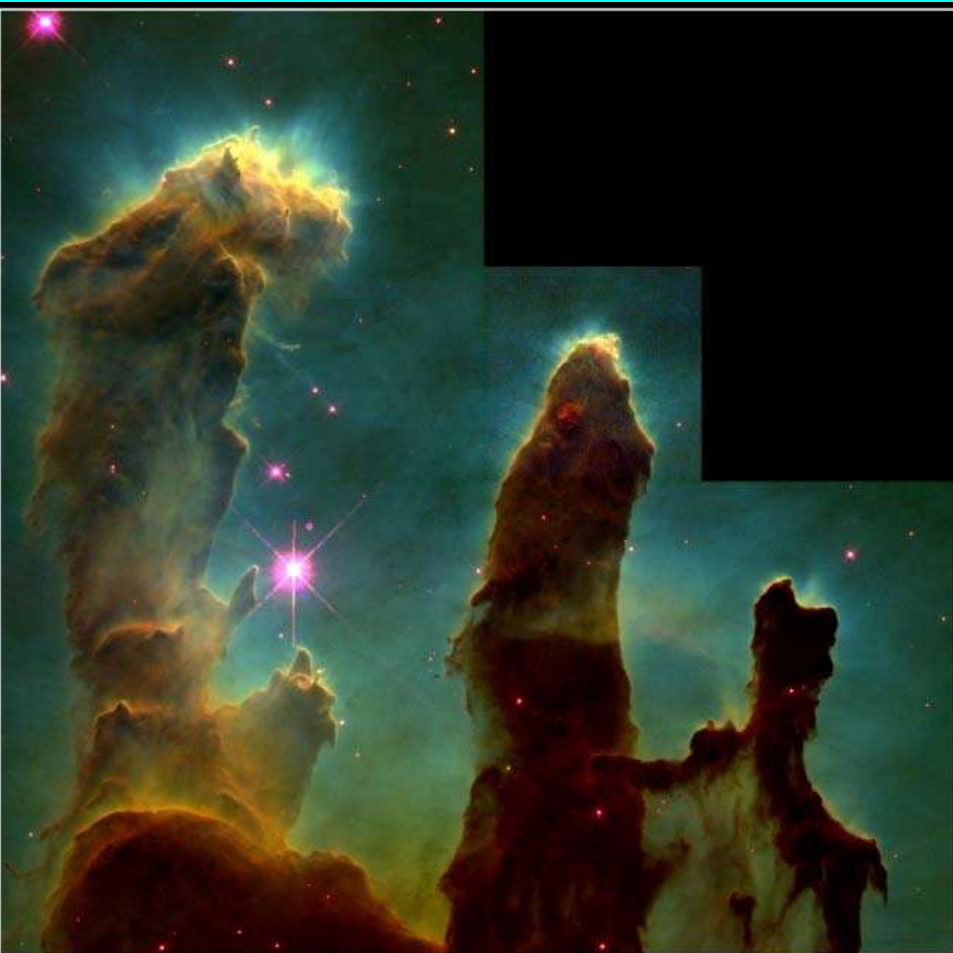






The Dark Cloud B68 at Different Wavelengths (NTT + SOFI)





**Gaseous Pillars · M16**

PRC95-44a · ST ScI OPO · November 2, 1995  
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

**HST · WFPC2**



**Star-Birth Clouds · M16**

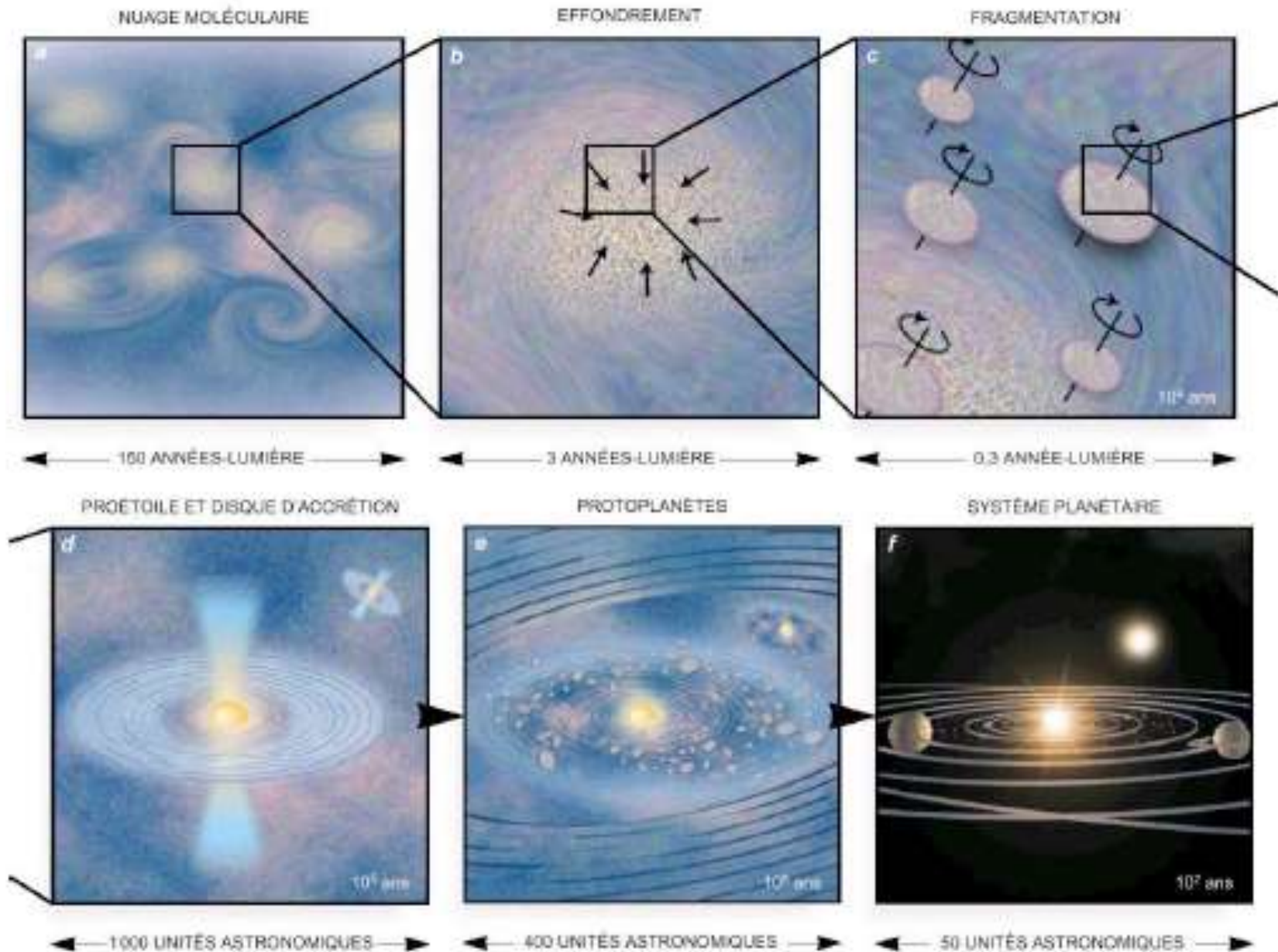
PRC95-44b · ST ScI OPO · November 2, 1995  
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

**HST · WFPC2**





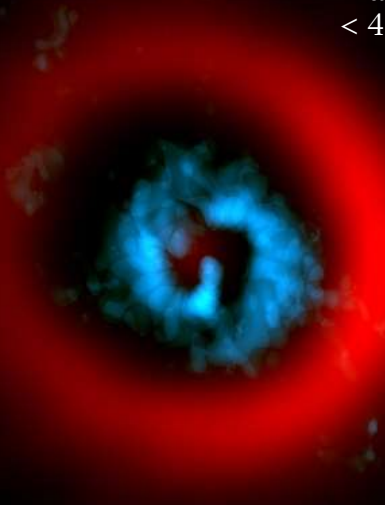
# Grandes étapes de la formation des planètes





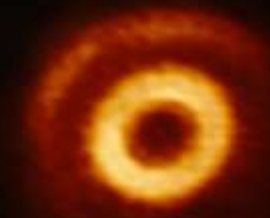
# AB Aurigae

2 masses solaires  
< 4 millions



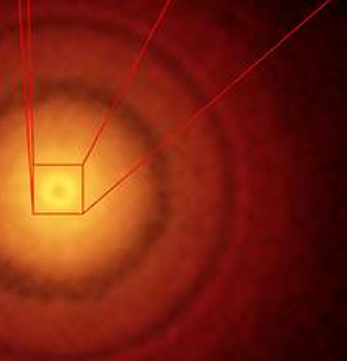
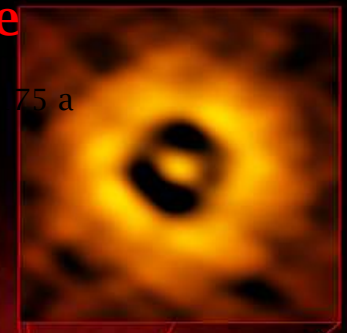
# ALMA

V1247 Orionis



# TW Hydrae

Type T Tauri  
~ 8 millions

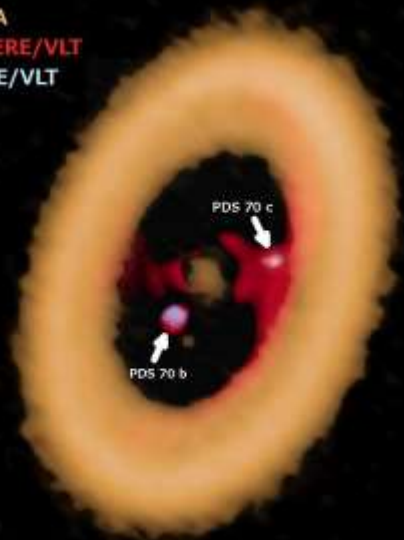


# SPHERE

Disques protoplanétaires

ALMA  
SPHERE/VLT  
MUSE/VLT

PDS70  
5,4 millions



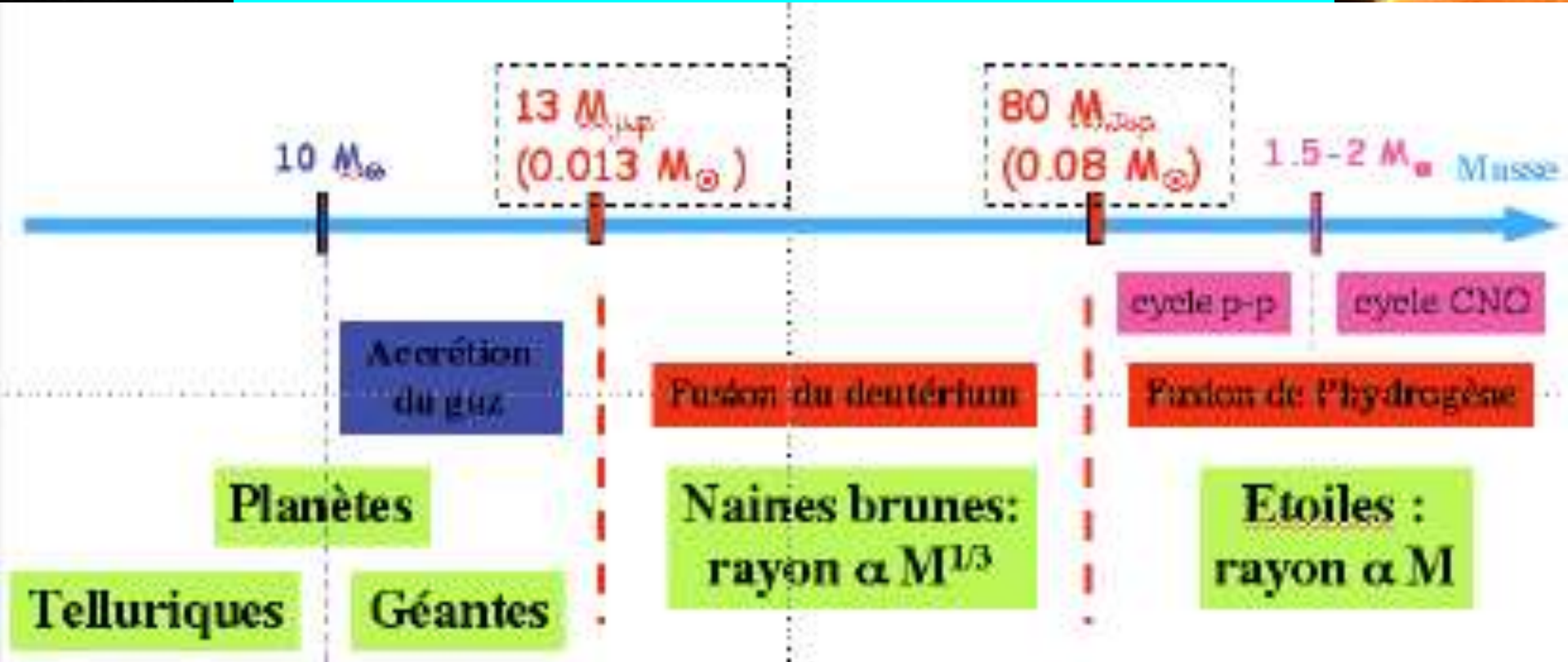
HD 135344B



RX J1615







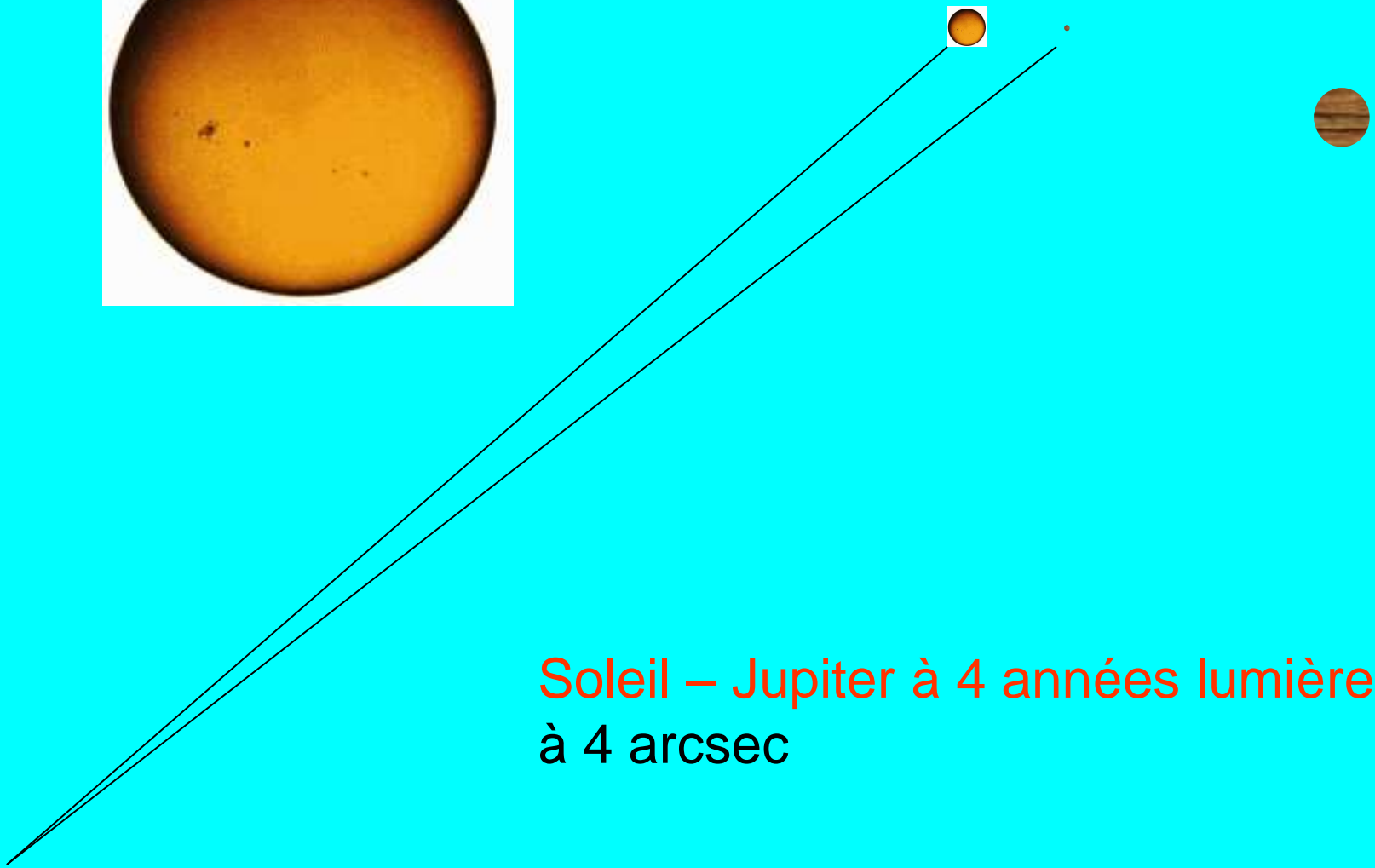


# Détection directe



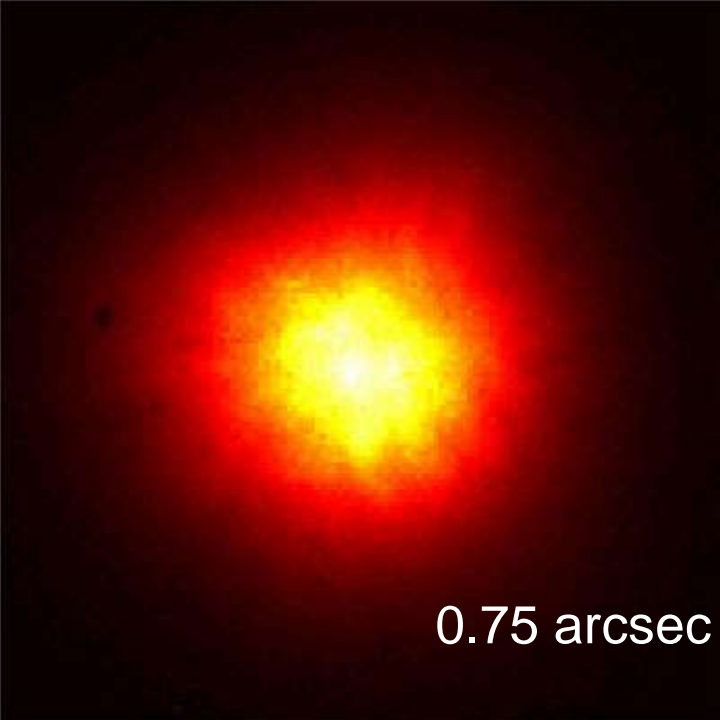
Deux difficultés principales :

1 – Une séparation angulaire très petite

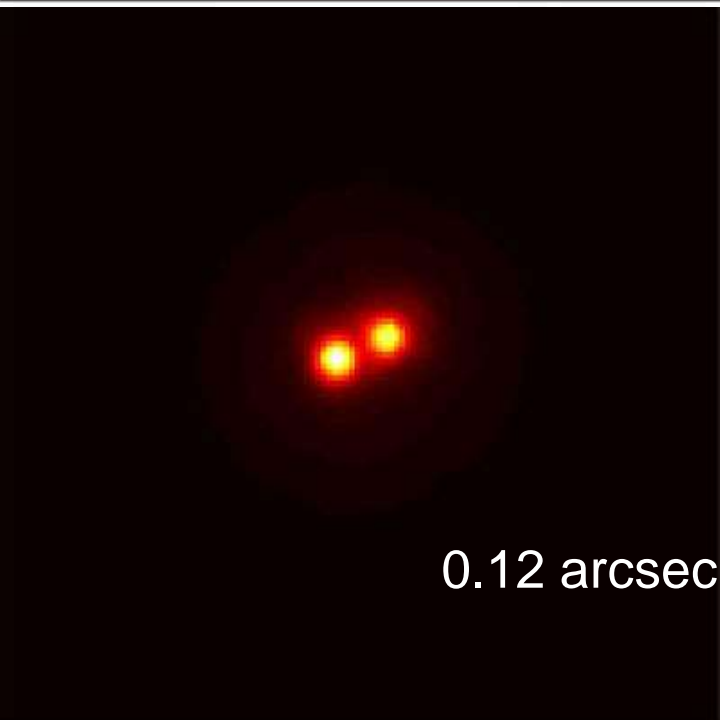


Soleil – Jupiter à 4 années lumière  
à 4 arcsec

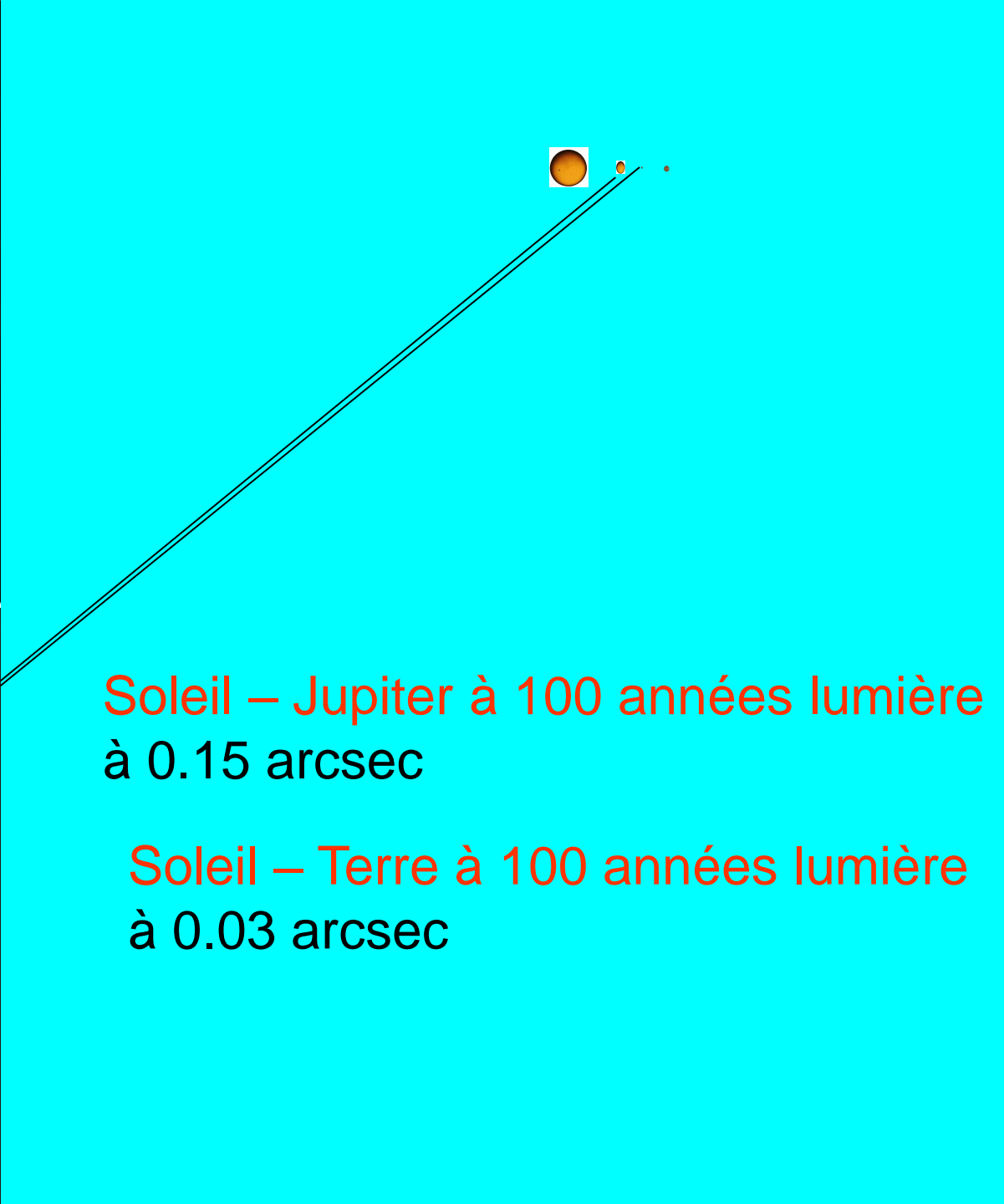




0.75 arcsec



0.12 arcsec



Soleil – Jupiter à 100 années lumière  
à 0.15 arcsec

Soleil – Terre à 100 années lumière  
à 0.03 arcsec



# Détection directe



Deux difficultés principales :

- 1 – Une séparation angulaire très petite
- 2 – Un énorme contraste en luminosité

L'étoile est environ 10 milliards  
de fois plus brillante que la  
planète





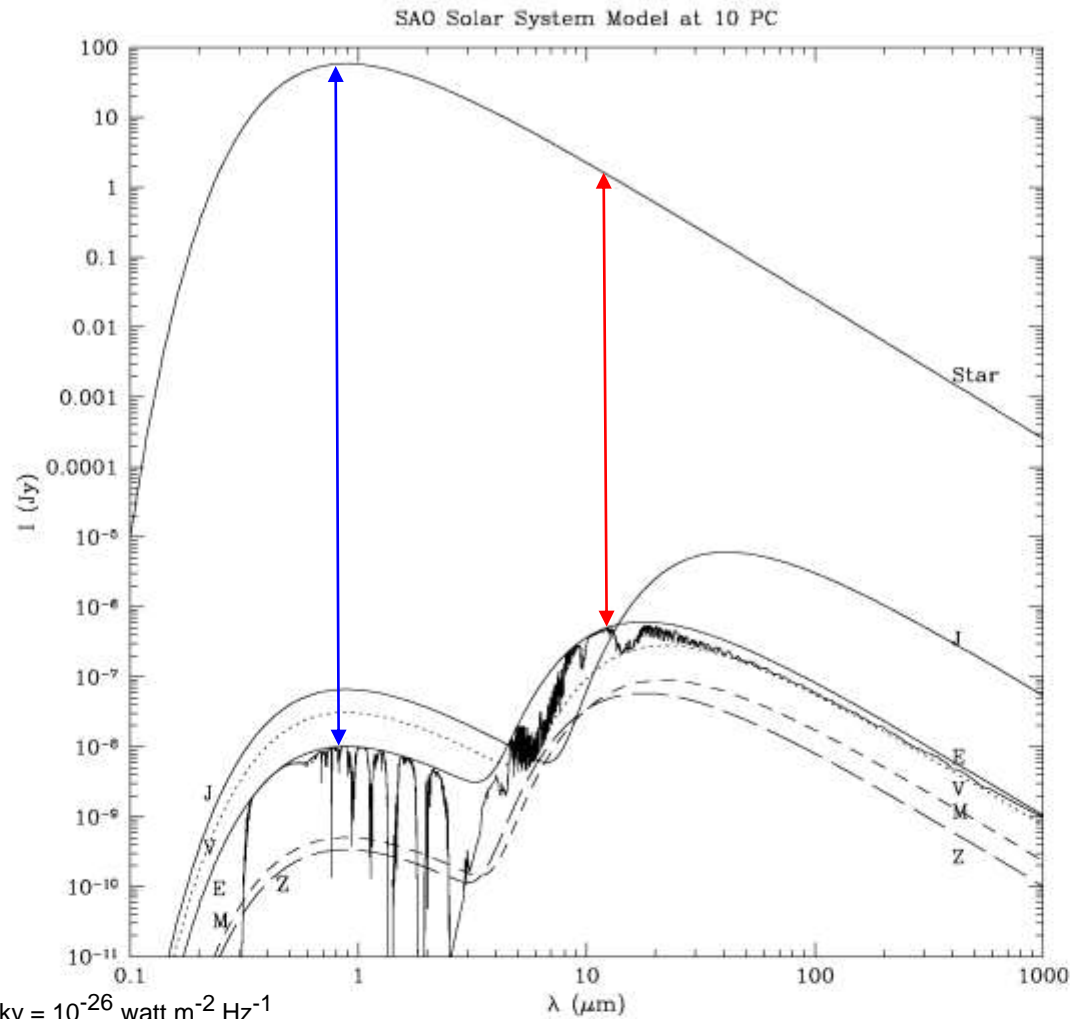


# Détection directe

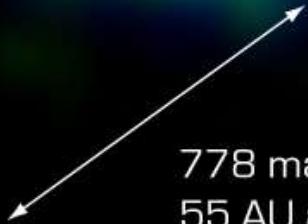
**25 mag**  
**10 milliards**

La Terre autour d'une étoile à environ 30 années lumière  $\equiv$  un ver luisant à 30 cm d'un phare de marine situé à Marseille, l'observateur se trouvant à ... Paris!

**17,5 mag**  
**10 millions**

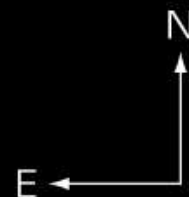


2MASSWJ1207334-393254



778 mas  
55 AU at 52 pc

**NACO observation at the VLT (ESO)**



A



b



The Sub-Stellar Companion to GQ Lupi  
(NACO/VLT)

(7 April 2005)

© European Southern Observatory

AB Pic

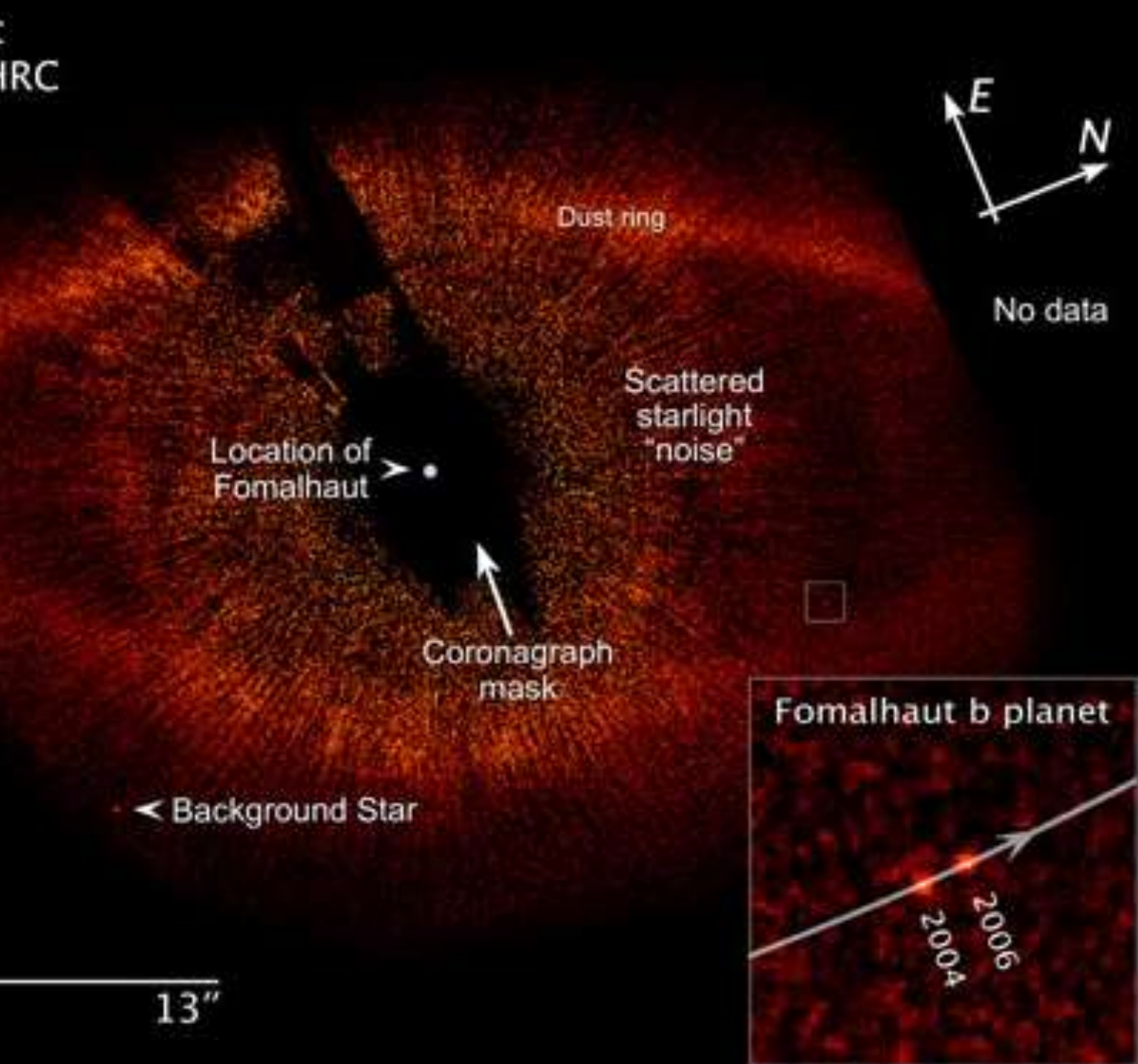
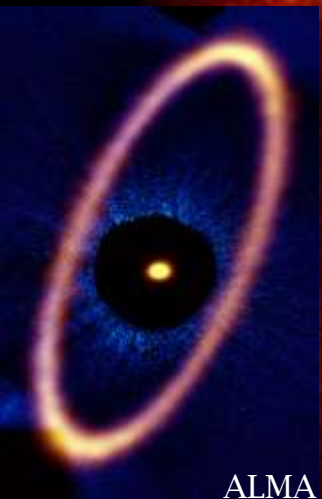


The Star AB Pictoris and its Companion  
(VLT/NACO)

ESO PR Photo 14d/05 (30 April 2005)

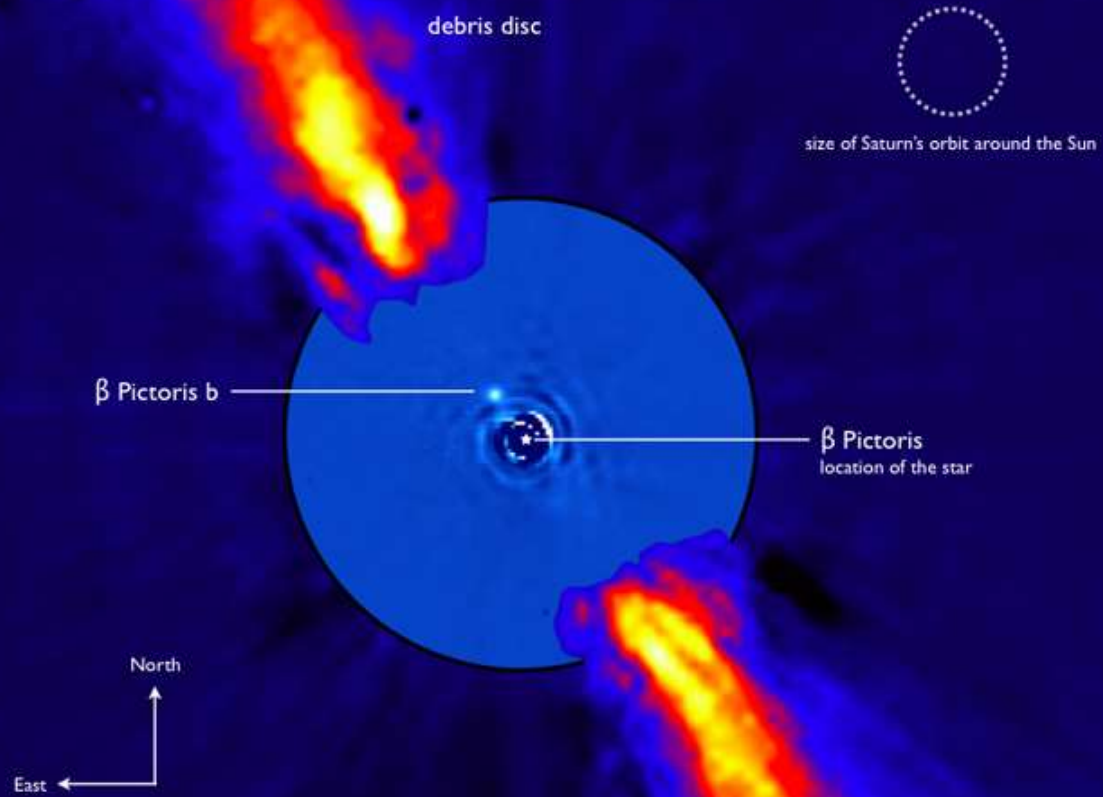
© ESO

# Fomalhaut HST ACS/HRC



100 AU      13"





0.5 arcsec

10 AU

size of Saturn's orbit  
around the Sun

dust disk  
in J band (1.3  $\mu\text{m}$ )

giant planet  $\beta$  Pic b  
seen in L' band (3.8  $\mu\text{m}$ )  
in October 2003

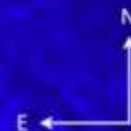
$\beta$  Pictoris  
position of the star (artificially subtracted)

in November 2009

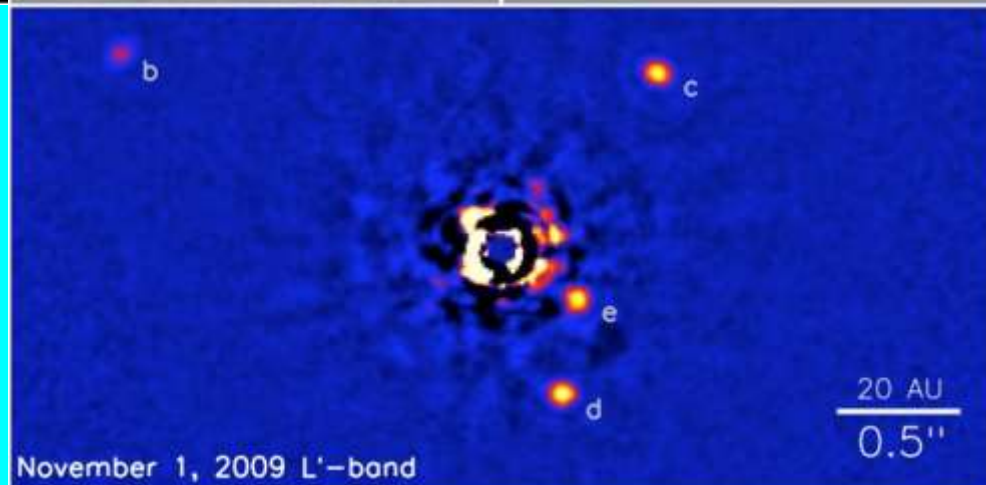
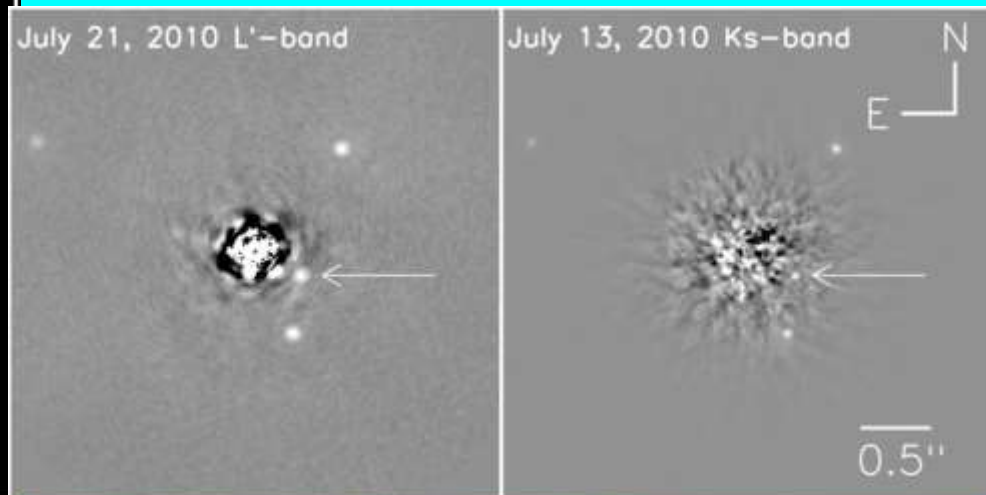
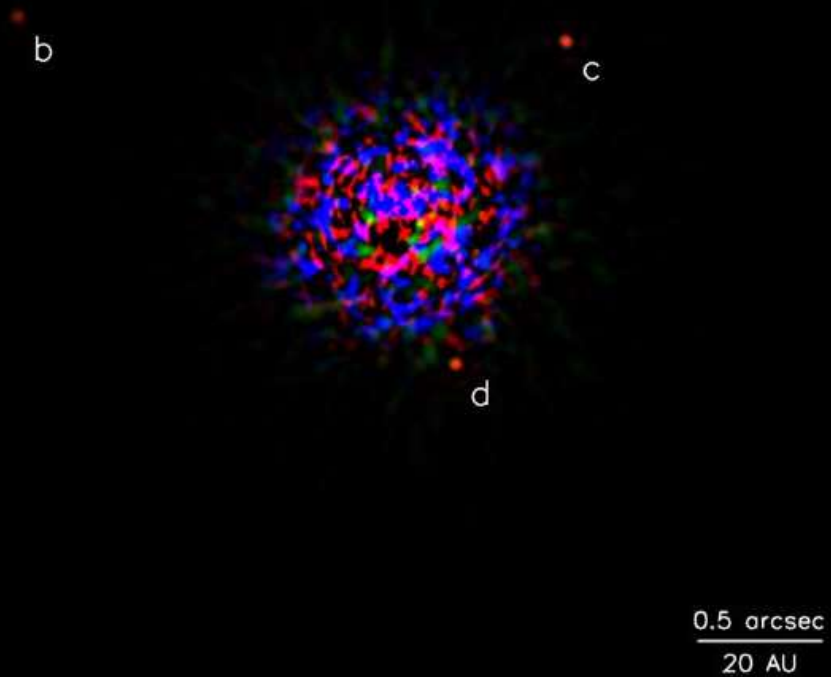
### Infrared view of the planetary system around the young star $\beta$ Pictoris

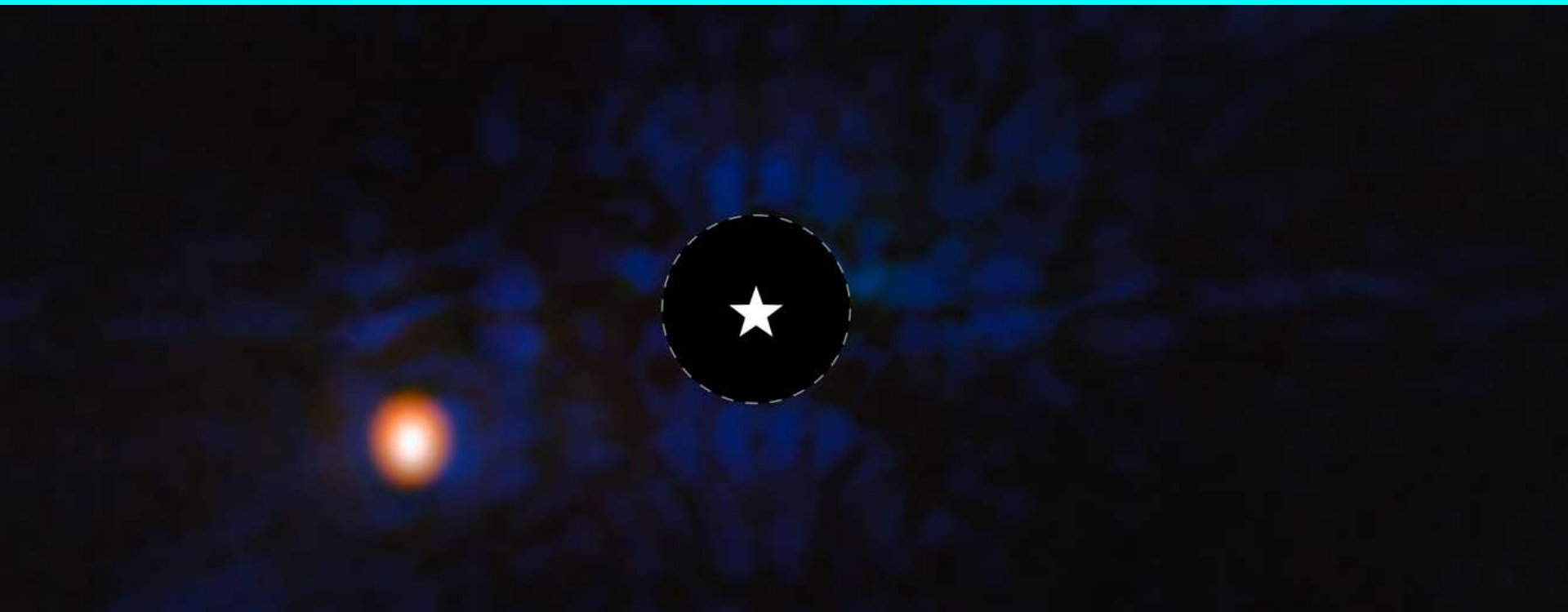
composed with images taken at the European Southern Observatory telescopes in Chile:

- the 3.6-m telescope + ADONIS instrument in La Silla (Mouillet *et al.* 1997)
- the Very Large Telescope + NACO instrument in Paranal (Lagrange *et al.* 2009-2010)



# HR 8799 Planetary System (Sept. 2008)



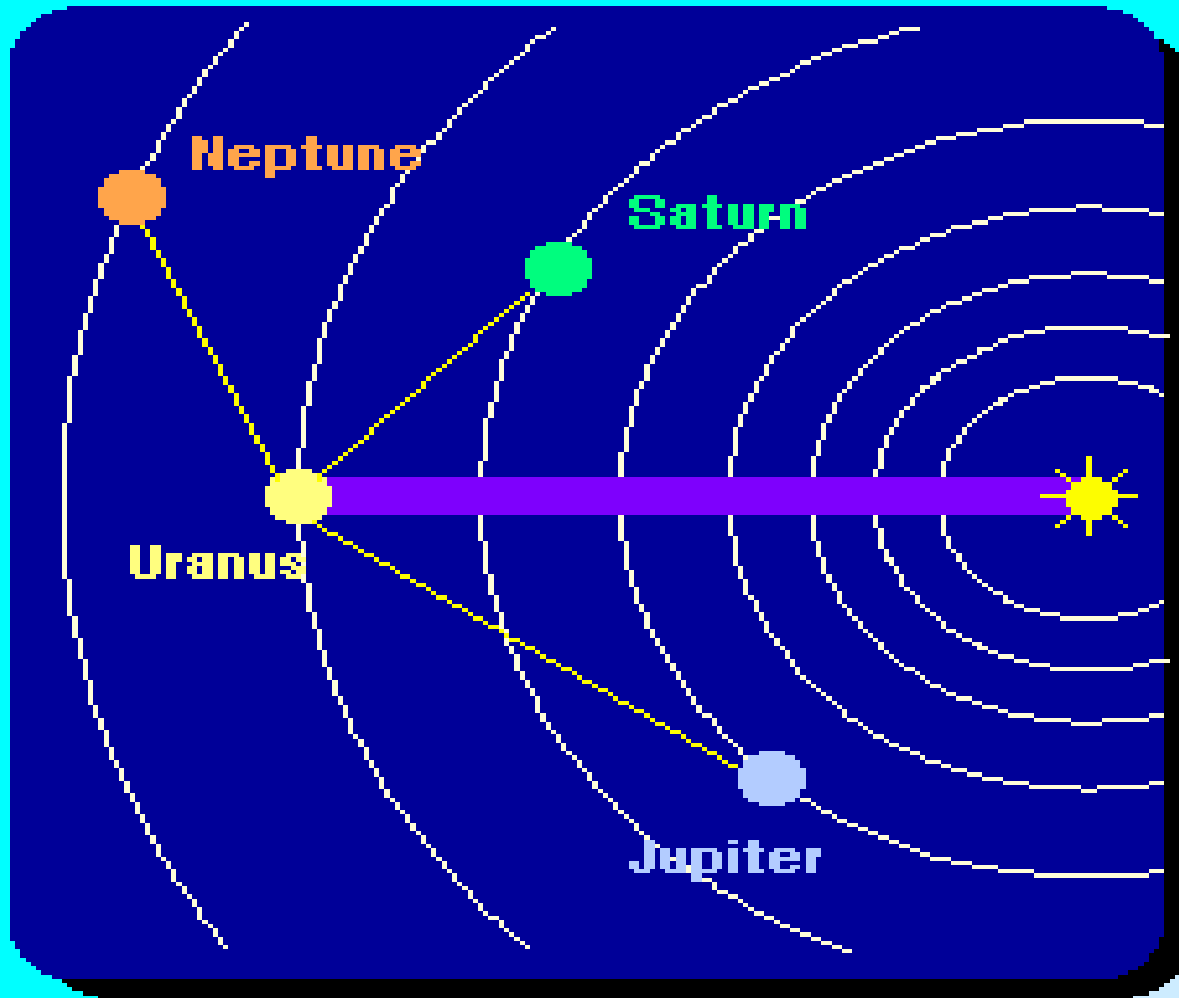
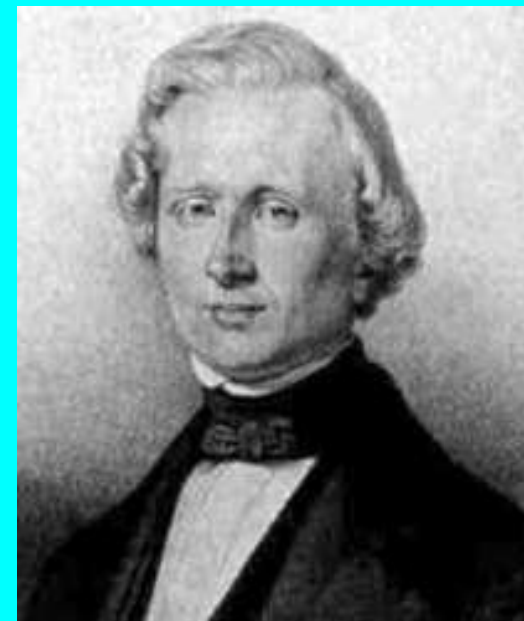


## **Image JWST de Epsilon Indi Ab**

**(Cold Exoplanète froide à 12 a.l.)**



**Une solution:  
la méthode utilisée par Le Verrier en 1846 pour  
la découverte de Neptune: la perturbation  
gravitationnelle induite par la planète.**



retrouvant pas sa planète, M. Le Verrier se décide à coller à sa place dans le firmament un calcul qui prouve son existence.

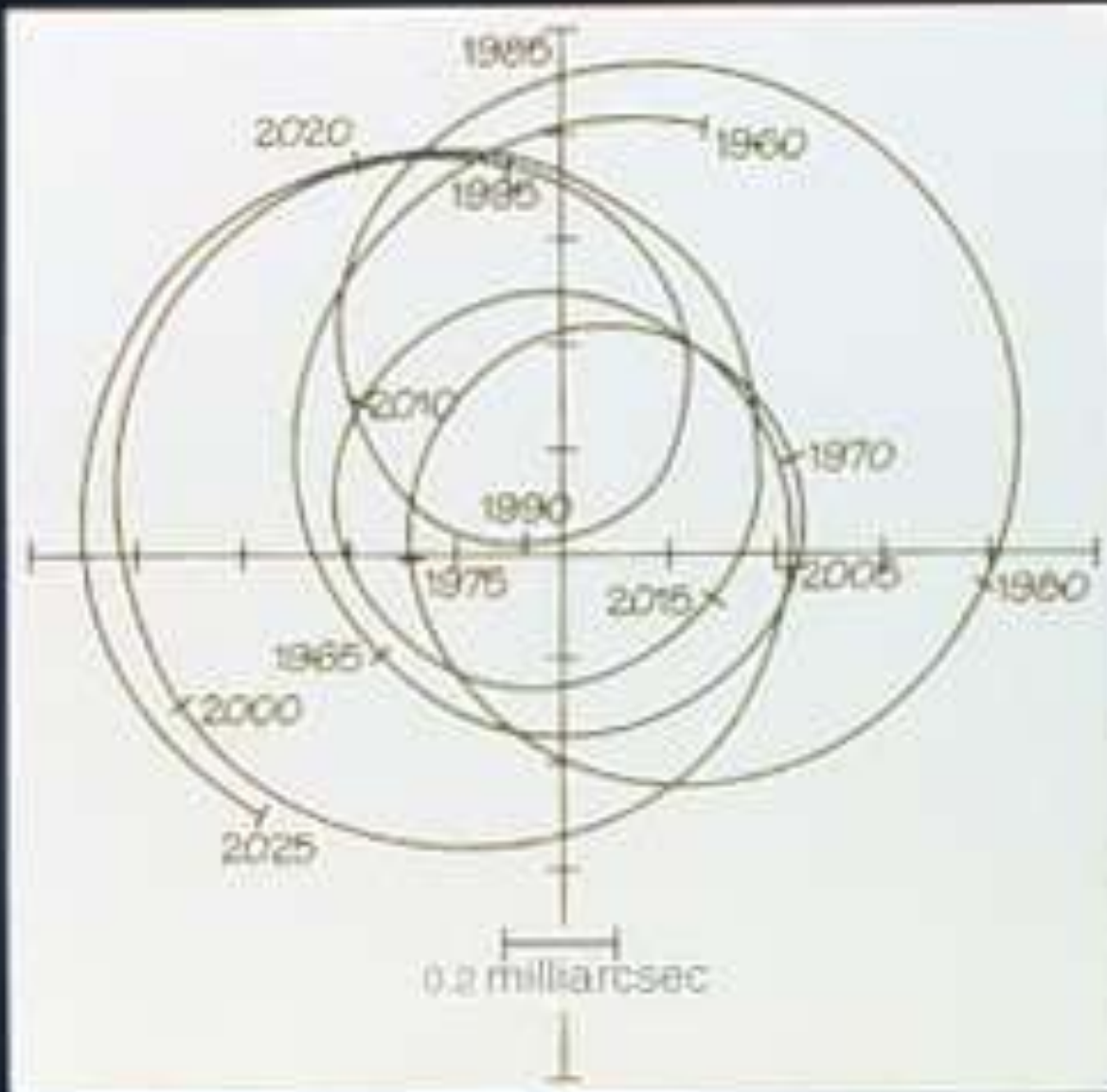
Centre de masse

# Effets dynamiques

- **Astrométrie**
- **Chronométrage**
- **Vélocimétrie**

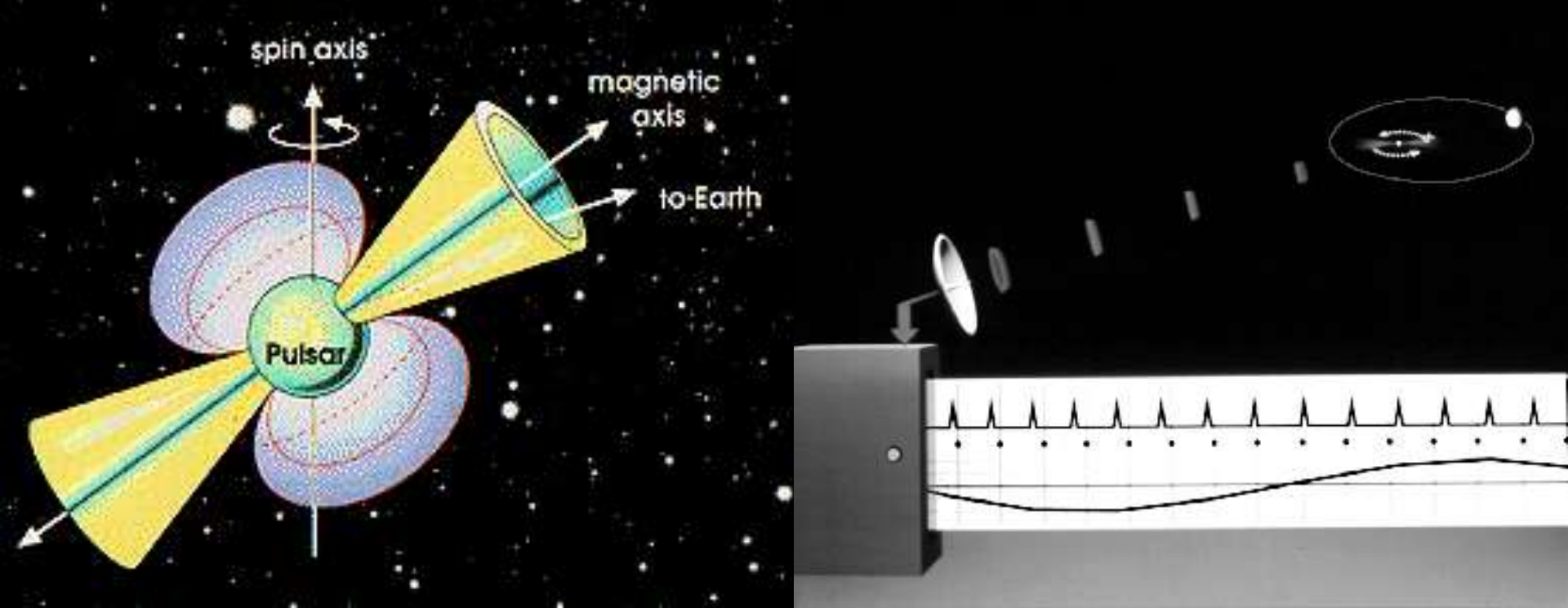


# Le mouvement du Soleil



Mouvement du  
Soleil autour du  
centre de masse  
du Système  
solaire,  
vu de  $\sim 30$  a.l.

# Chronométrage



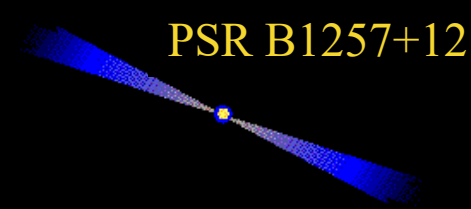
$$\tau [ms] = 1.6 \cdot \frac{M_p [M_{Terre}]}{M_{pulsar}^{4/3} [M_{Soleil}]} \cdot P^{2/3} [an]$$

*Evaporation of Hot-Jupiters*





Soleil



PSR B1257+12



Mercure



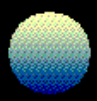
Venus



Terre



Planète A



Planète B

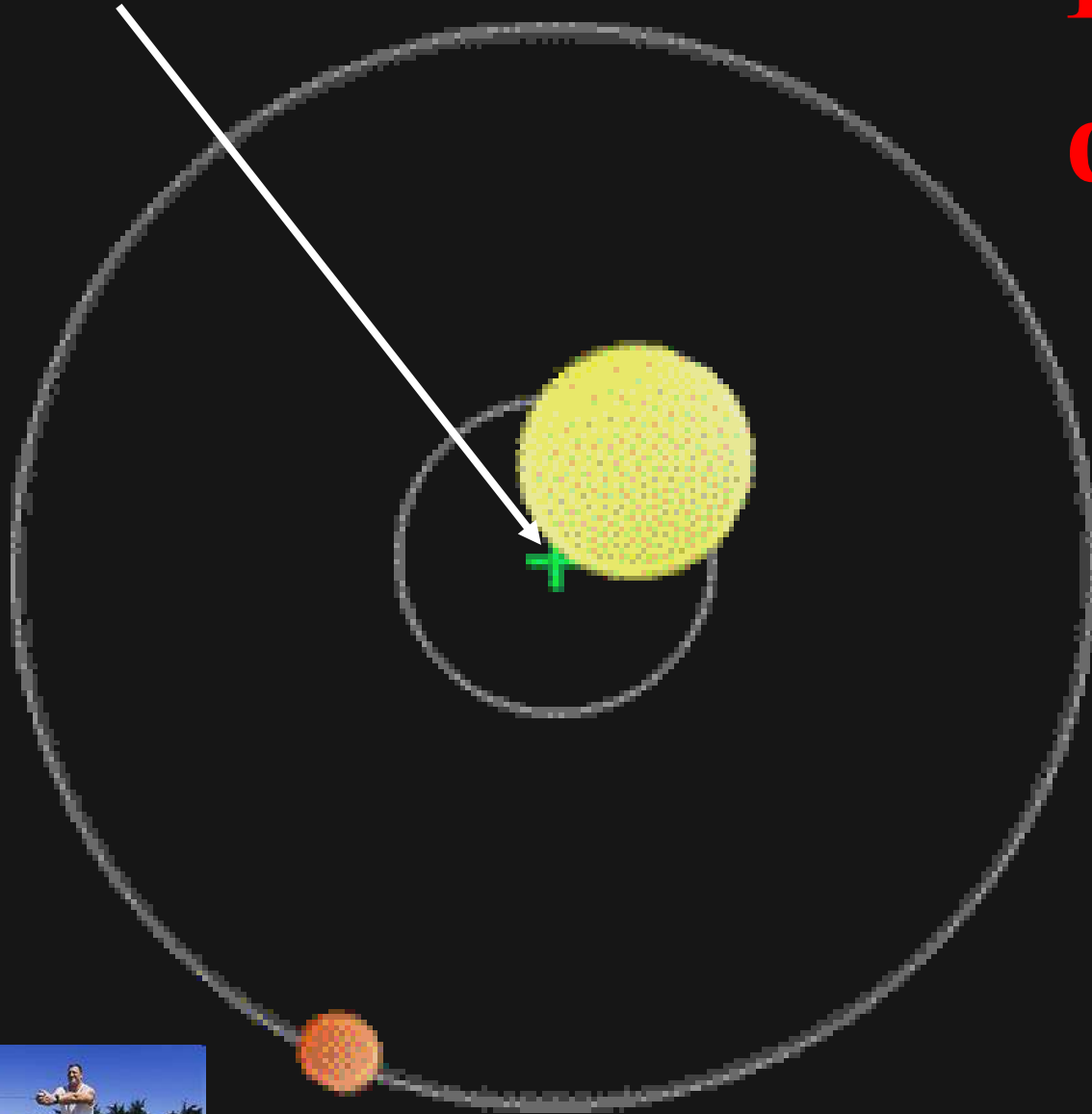


Planète C

Centre de masse

# Effets dynamiques

- **Astrométrie**
- **Chronométrage**
- **Vélocimétrie**

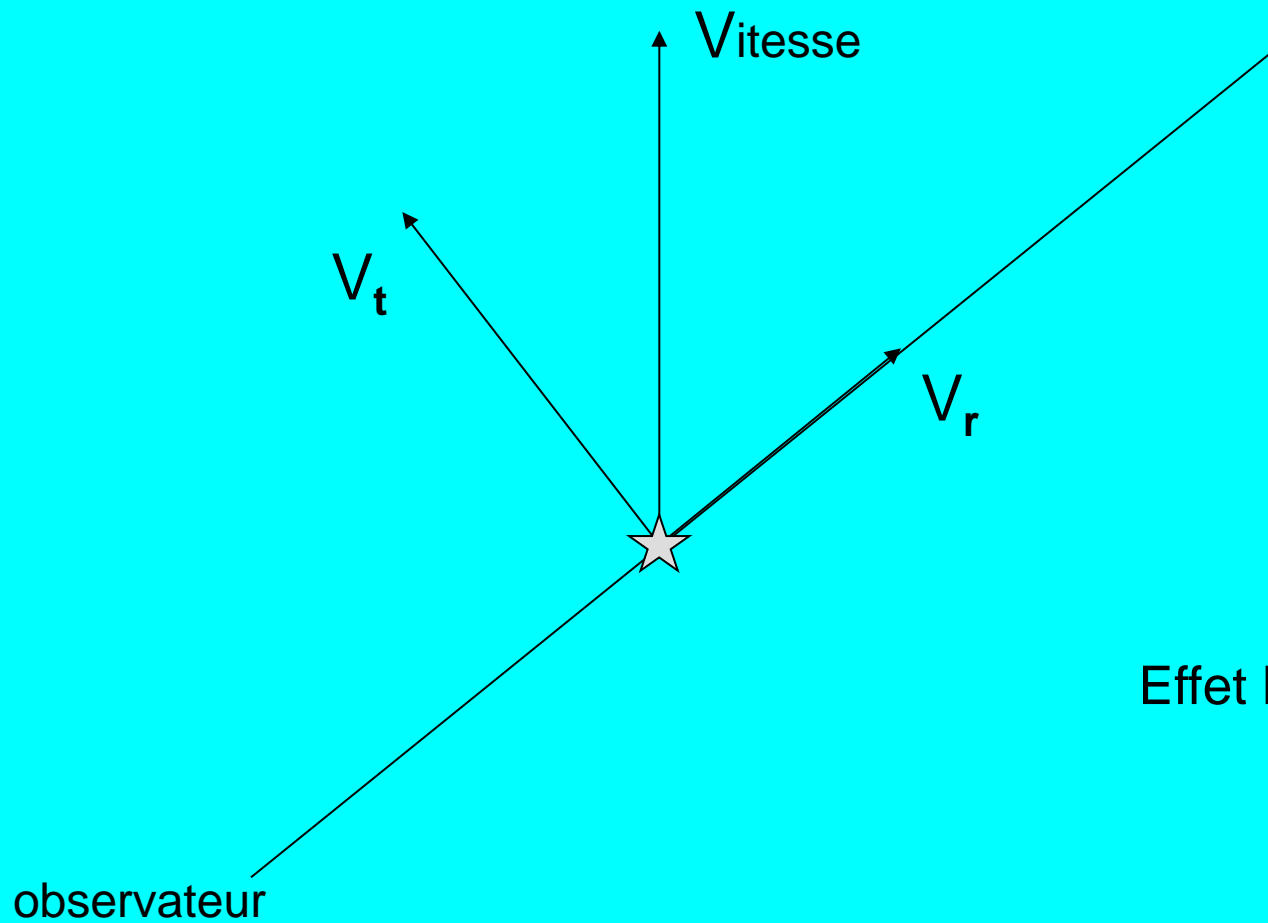


# Spectroscopie





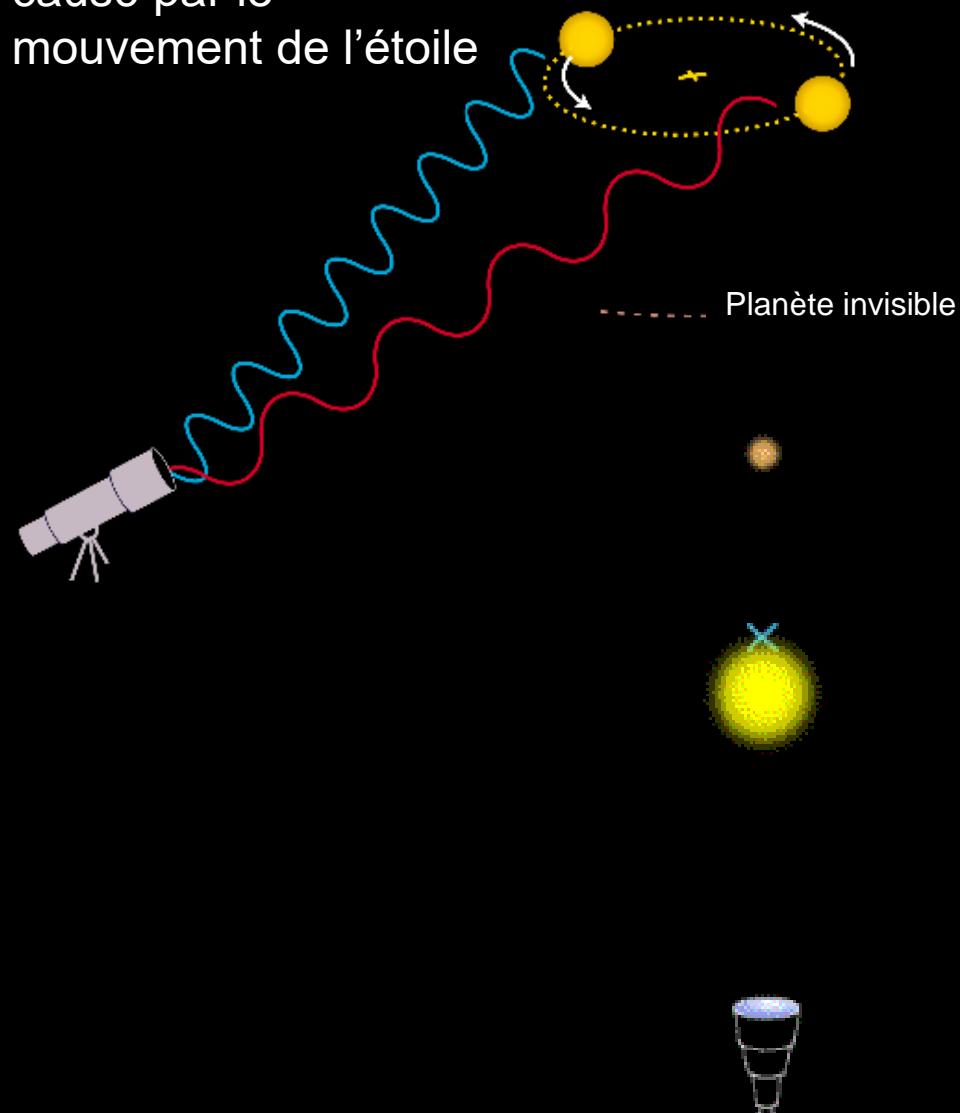
# Vitesse radiale



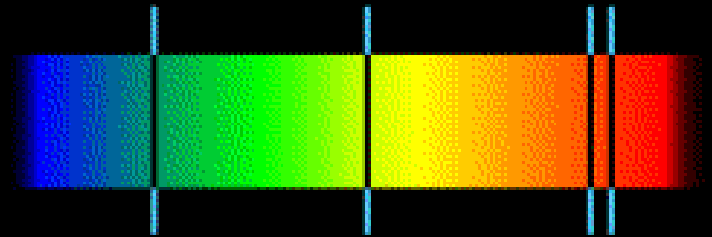
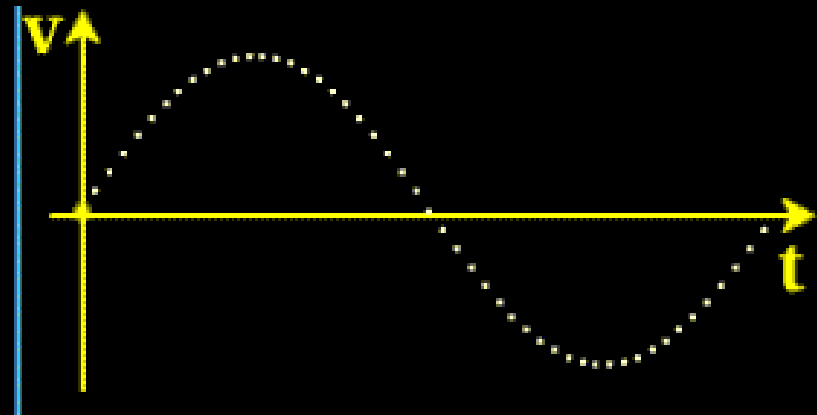
Effet Doppler-Fizeau

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{\delta v}{c}$$

Décalage Doppler  
causé par le  
mouvement de l'étoile



→  $M_p \sin i$



# Première planète extrasolaire en orbite autour d'une étoile de type solaire



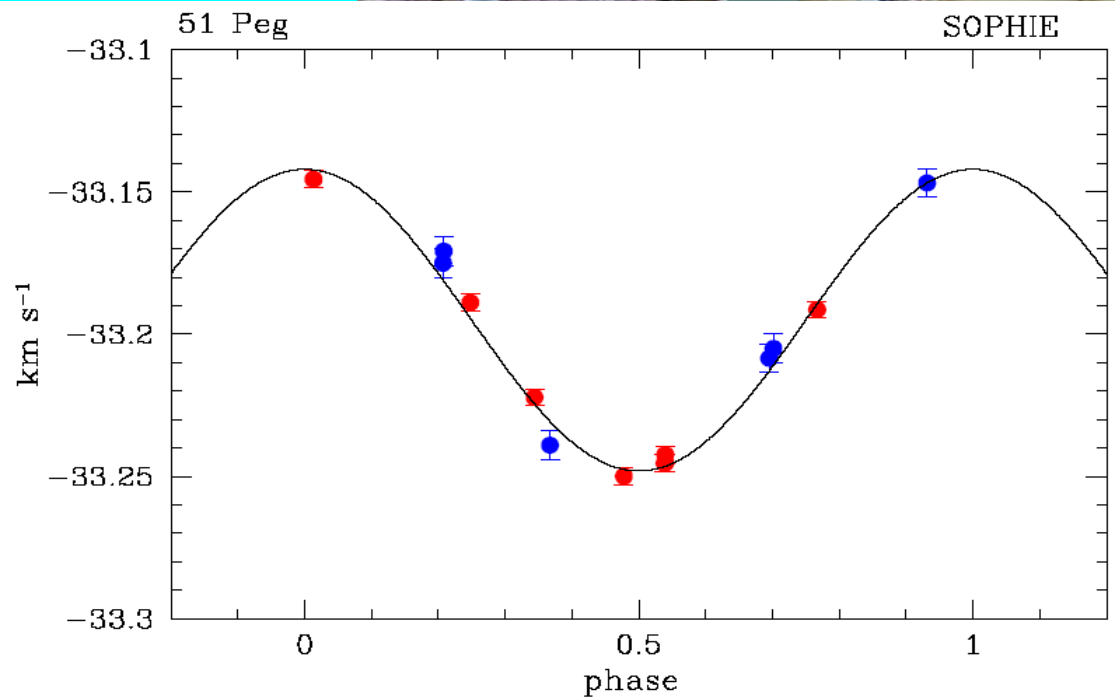
Mayor & Queloz  
1995

Prix Nobel 2019



Elodie

Observatoire de Haute Provence



$K = 59 \text{ m.s}^{-1}$

$a = 0.05 \text{ AU}$

$m_p \sin i = 0.47 \text{ m}_J$

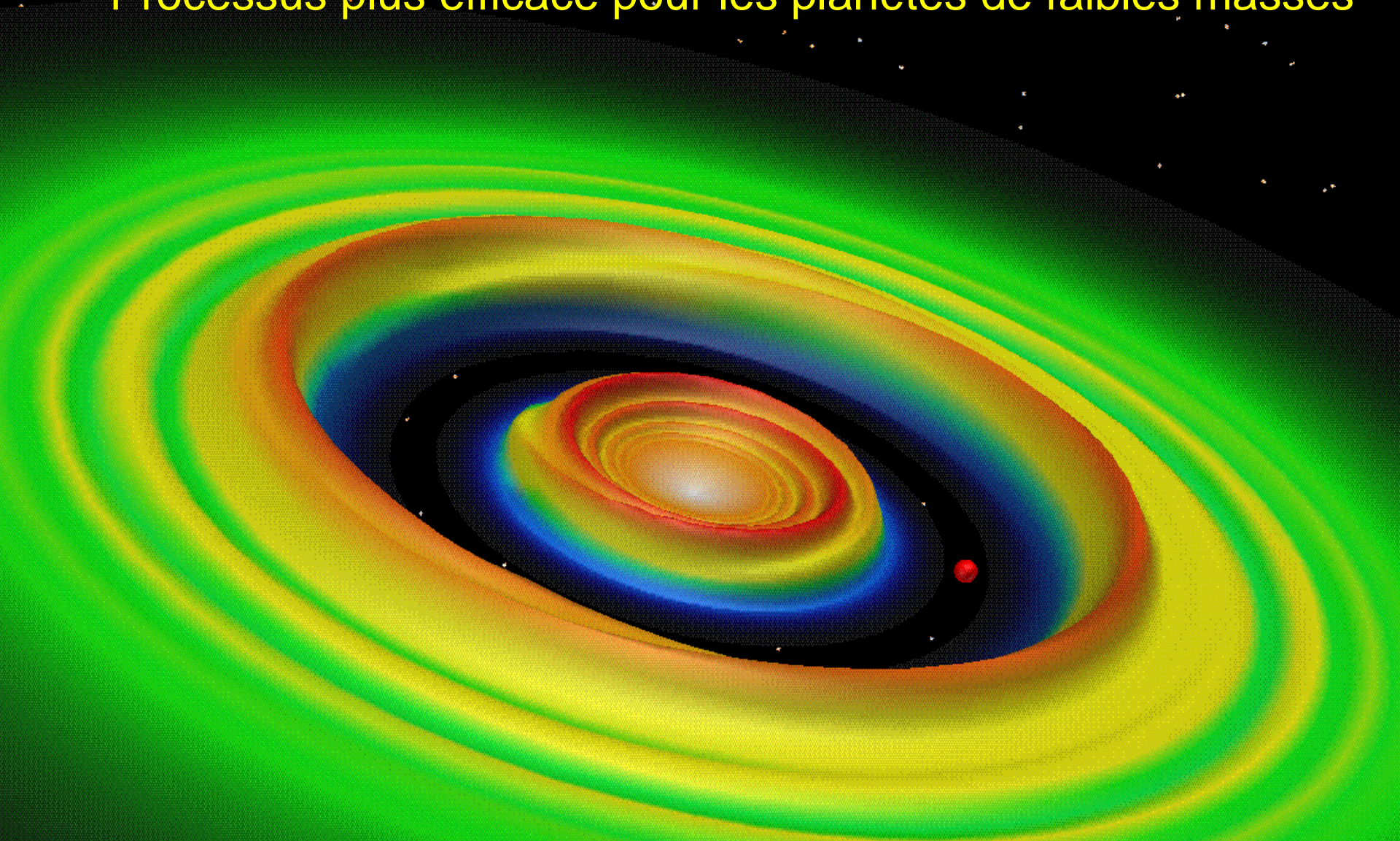
$P = 4.231 \text{ days}$



# Migration

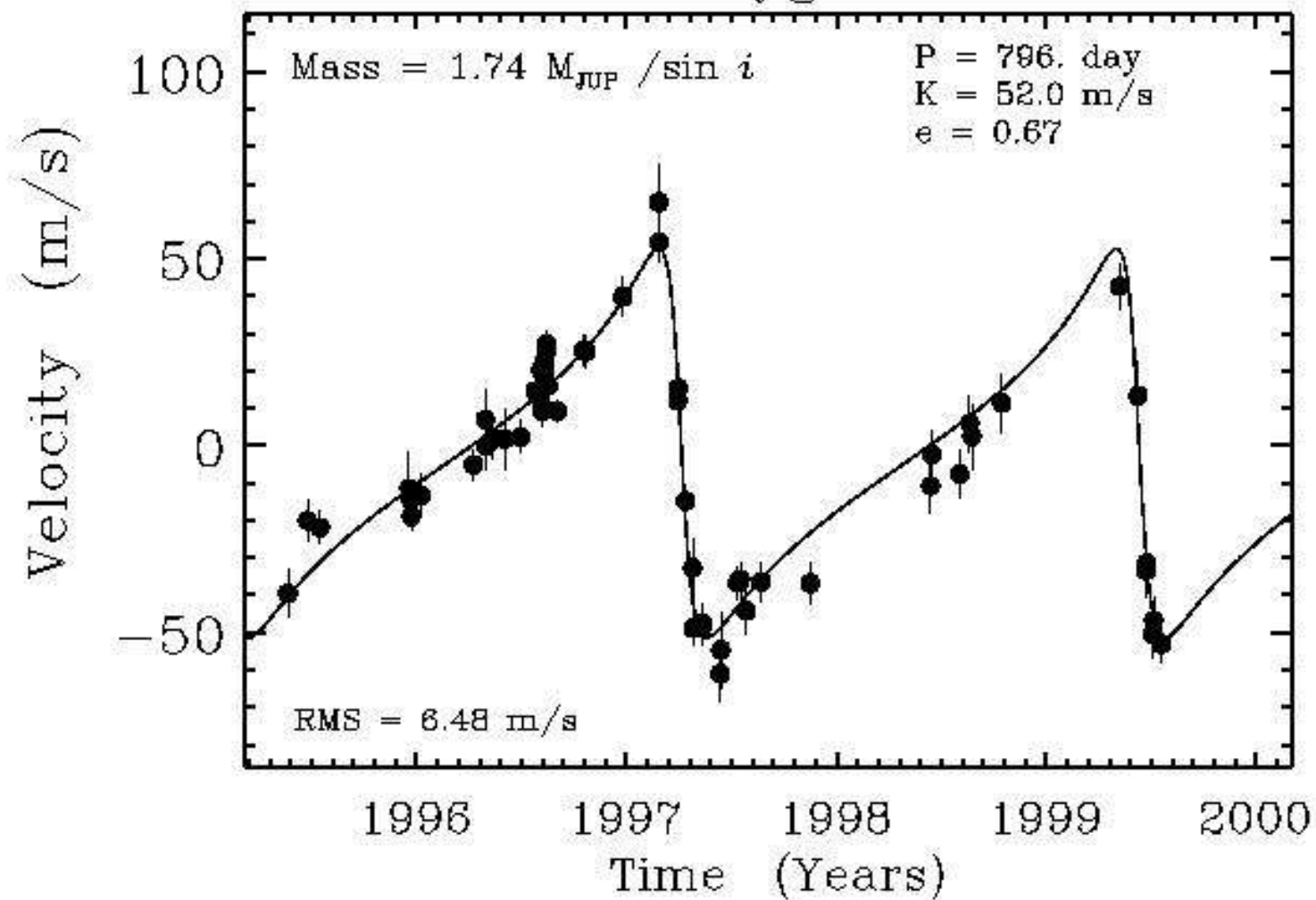
Due aux interactions gravitationnelles avec le disque

Processus plus efficace pour les planètes de faibles masses

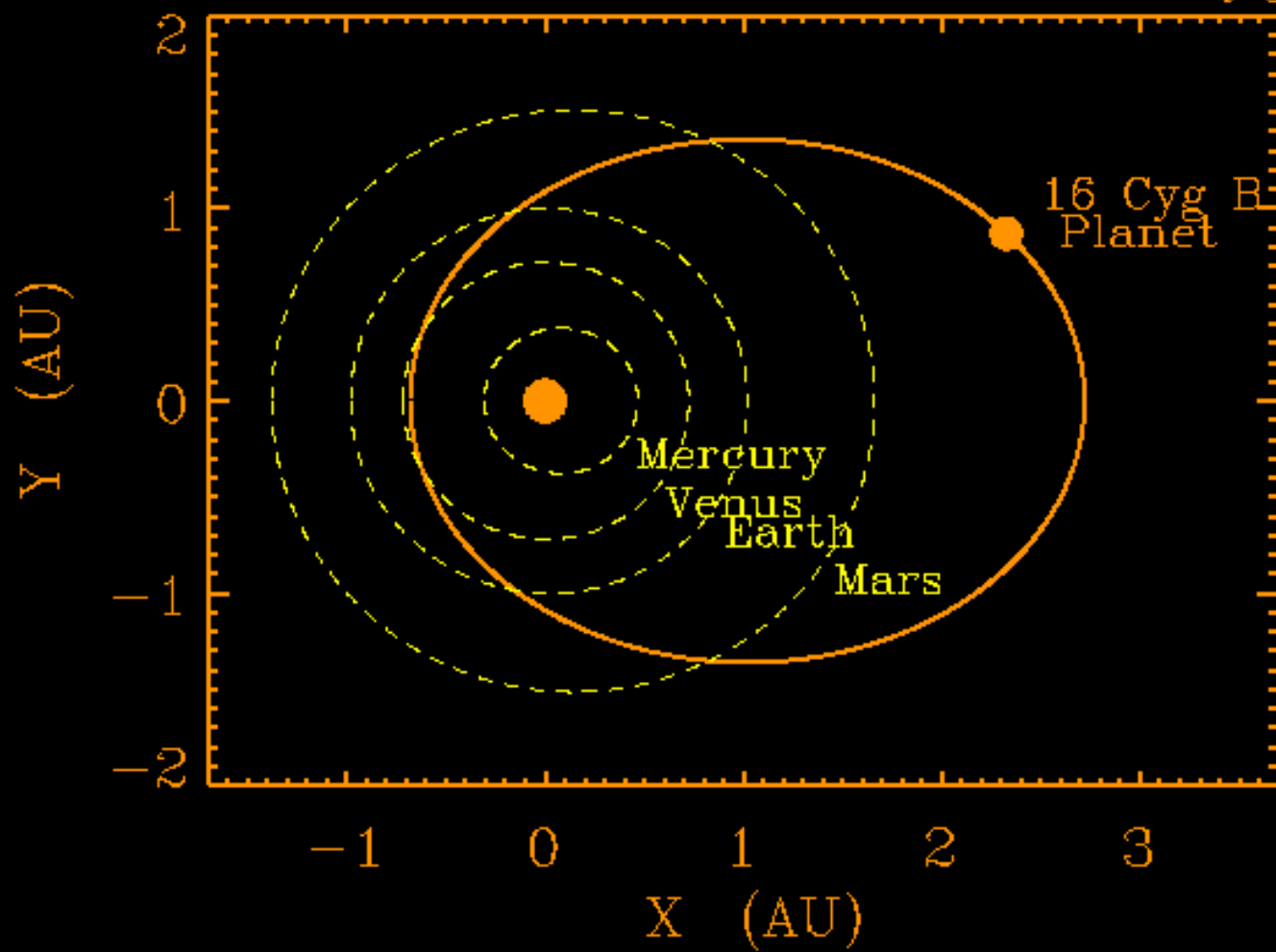




# 16 Cygni B



# Orbit of Planet Around 16 Cyg B





# Méthodes photométriques



L'occultation  
ou transit

---

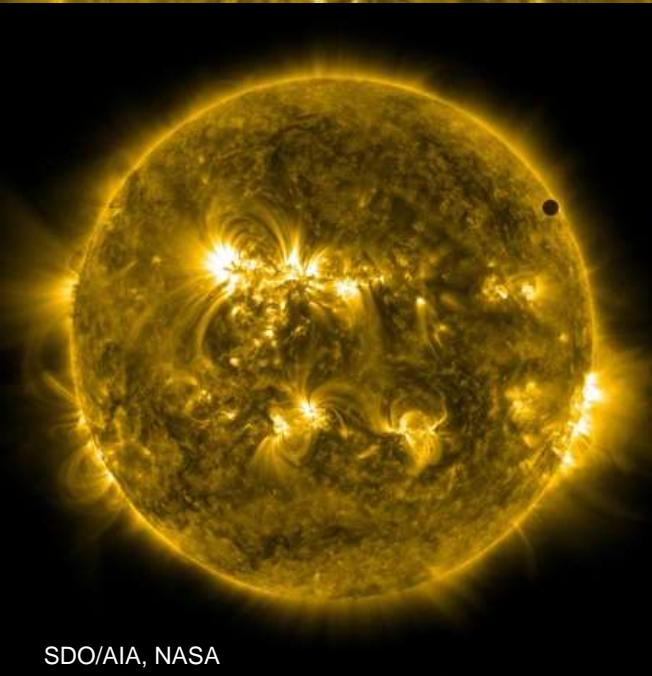
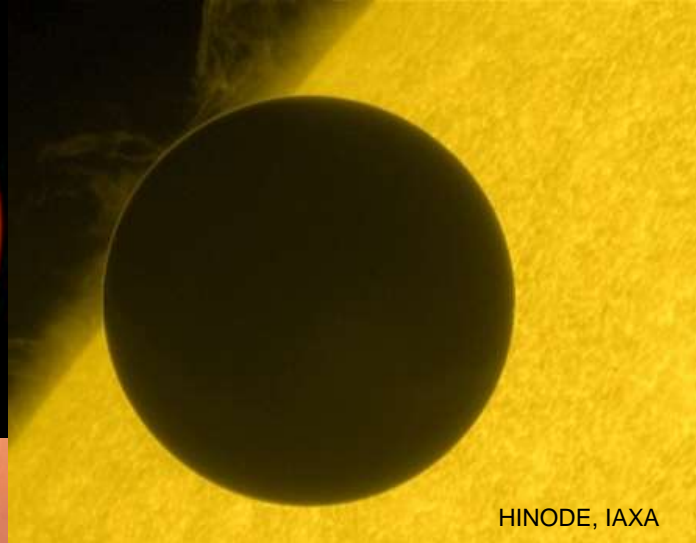
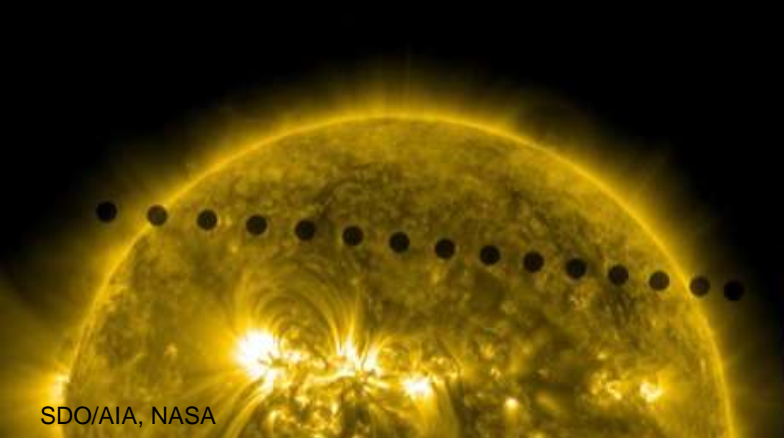


Transit de Mercure et passage d'un avion - 7 mai 2003 - MTO 1000mm et Nikon D1 - ©Philippe JACQUOT

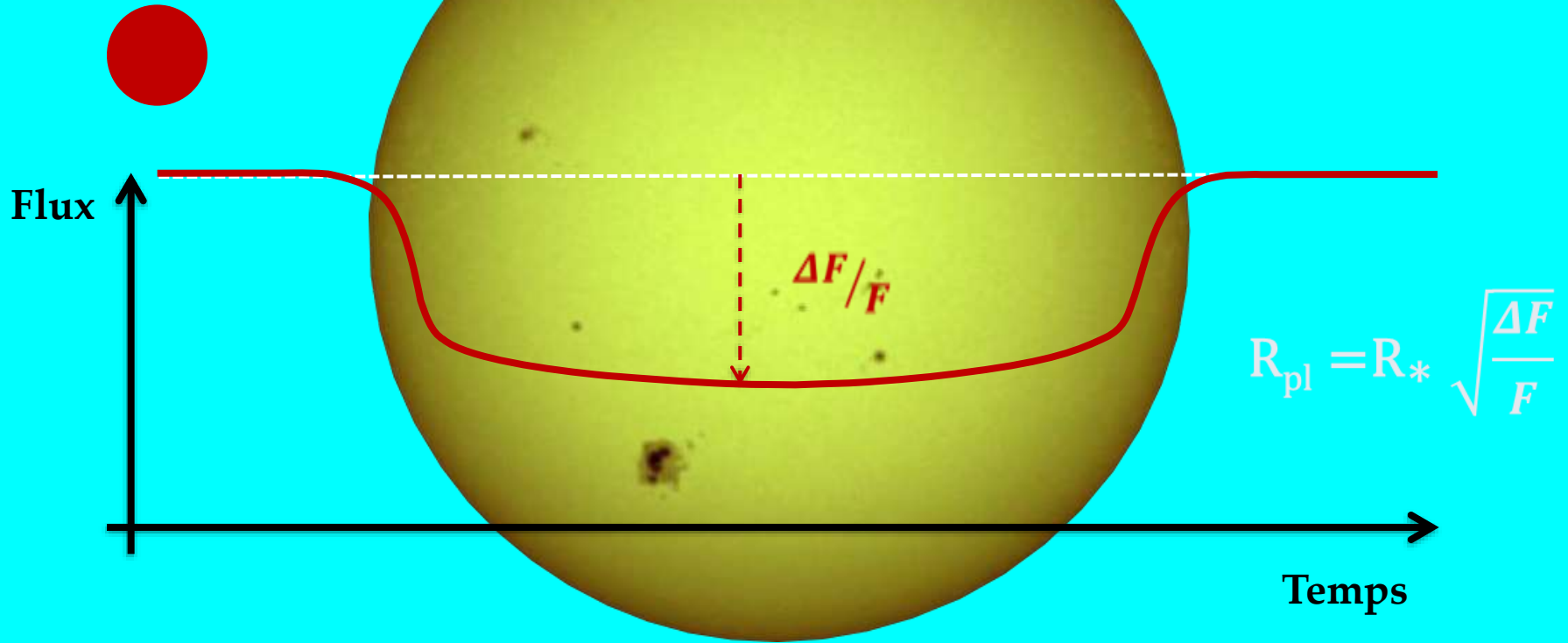


# Transit de Vénus

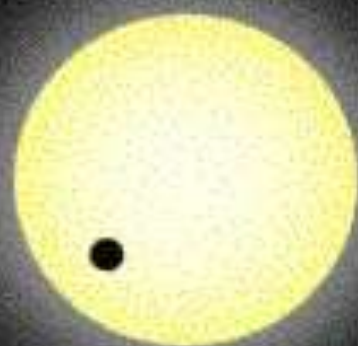
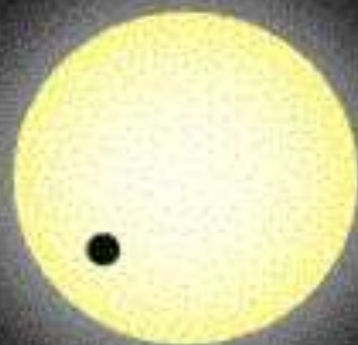
## 6 juin 2012



# Photométrie d'un transit

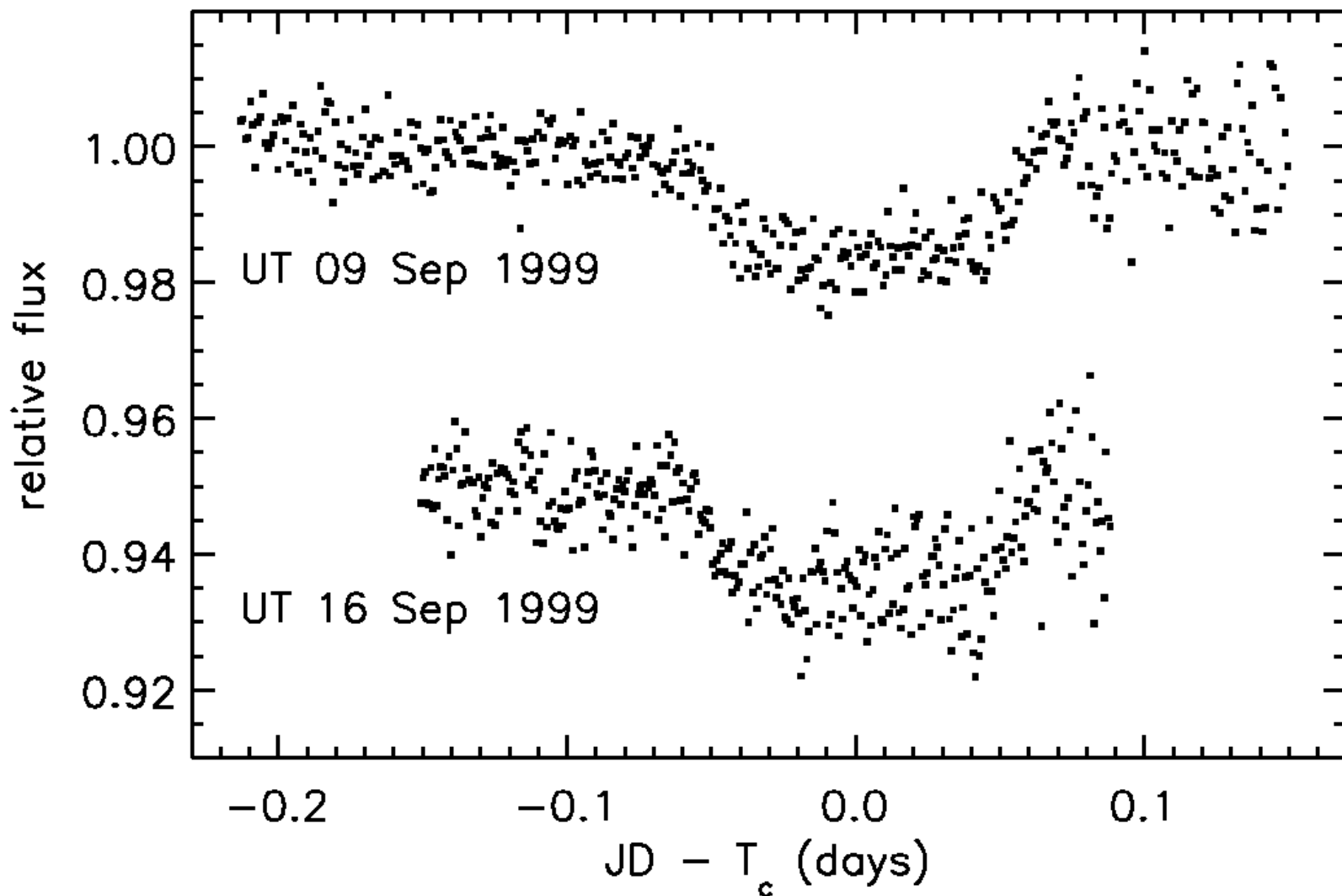


→ Rayon, inclinaison, période orbitale, etc.





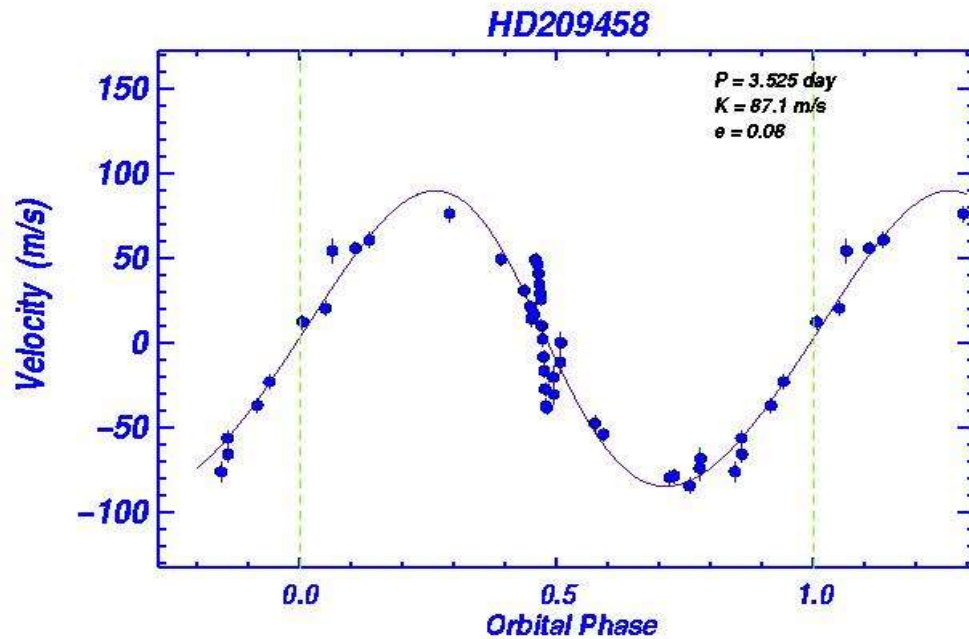
# Le transit d'Osiris





# Vitesse Radiales / Occultation

## Osiris

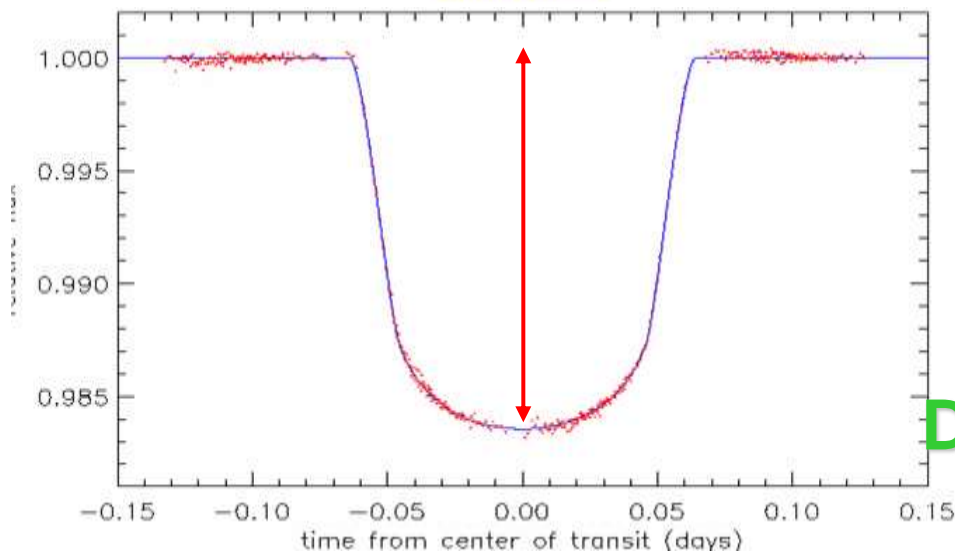


Période =  $3.52474859 \pm 0.00000038$  jours

Masse =  $0.64 \pm 0.06 M_{\text{Jupiter}}$

**1,6%**  
**absorption**

Rayon =  $1.320 \pm 0.025 R_{\text{Jupiter}}$



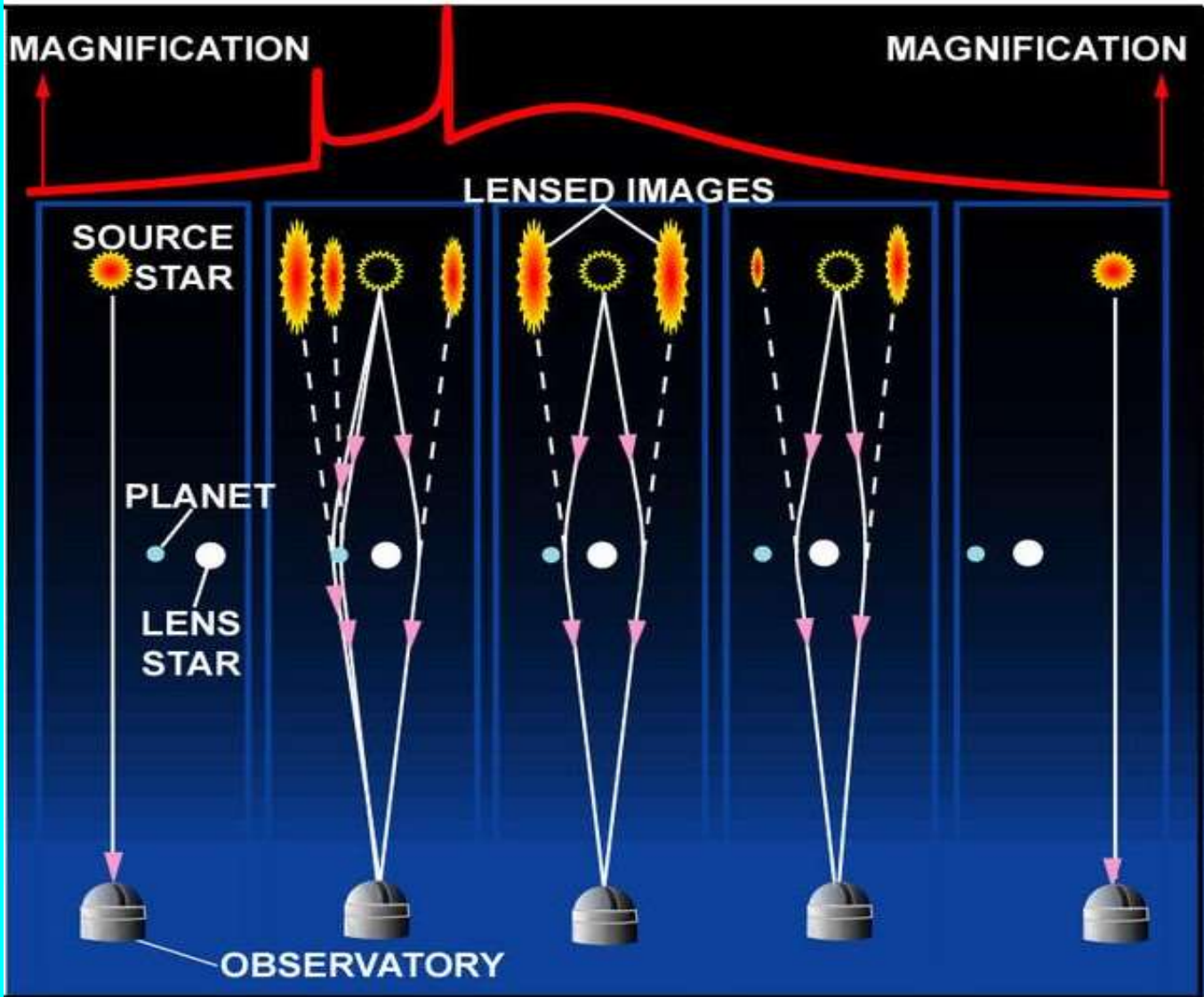
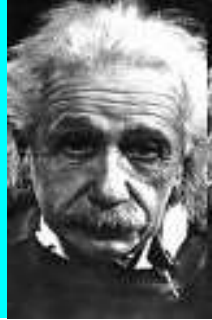
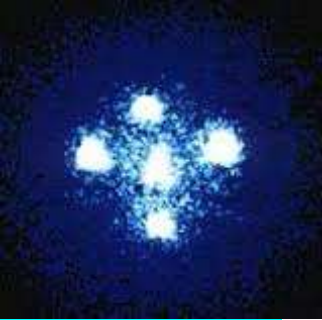
Densité =  $0.345 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$

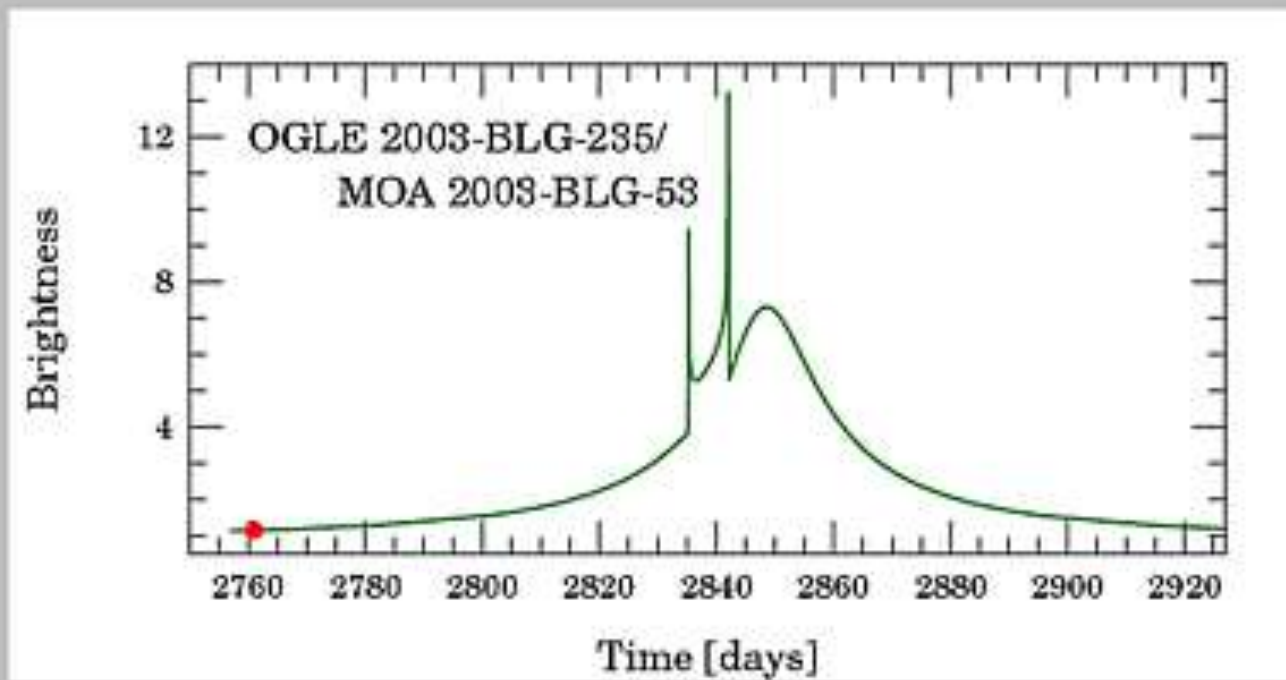
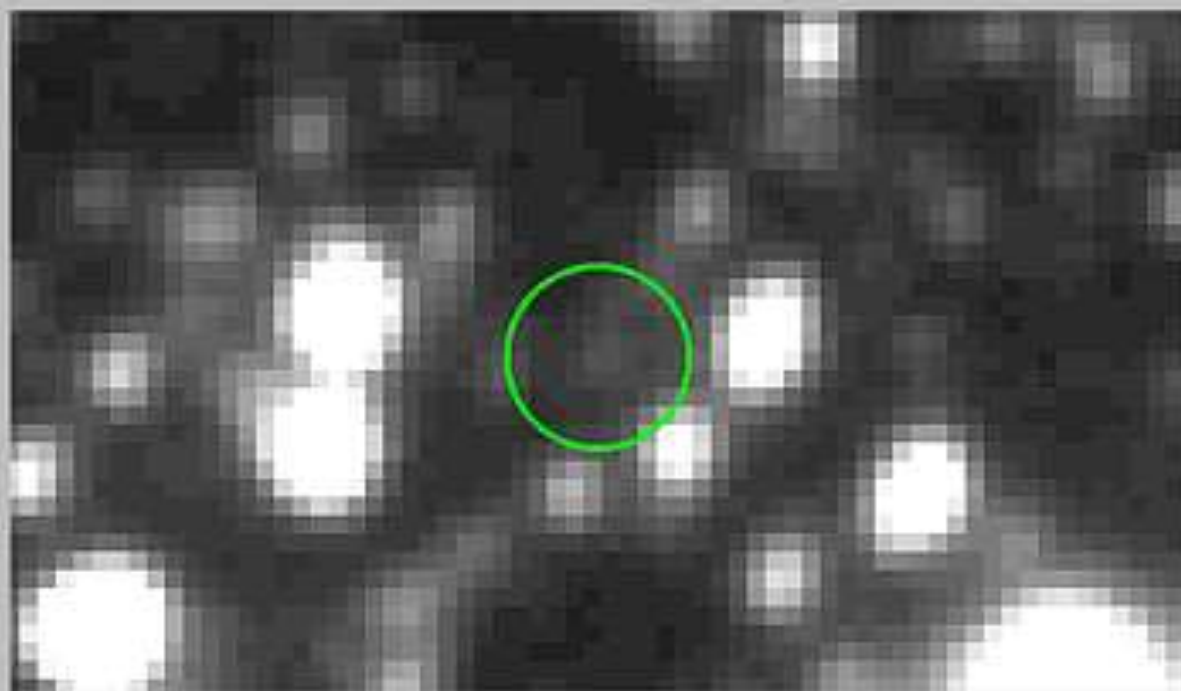


# Méthodes photométriques

Microlentille  
gravitationnelle

---





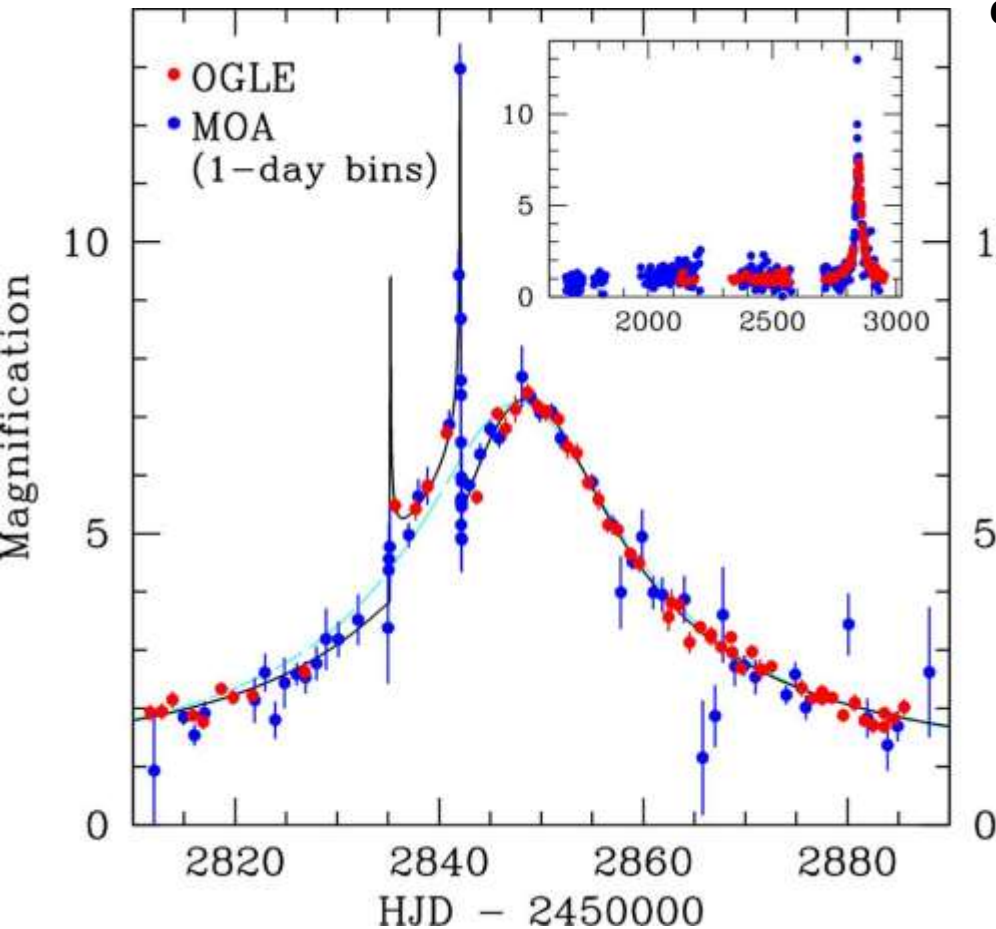


# Première planète découverte par microlentille gravitationnelle

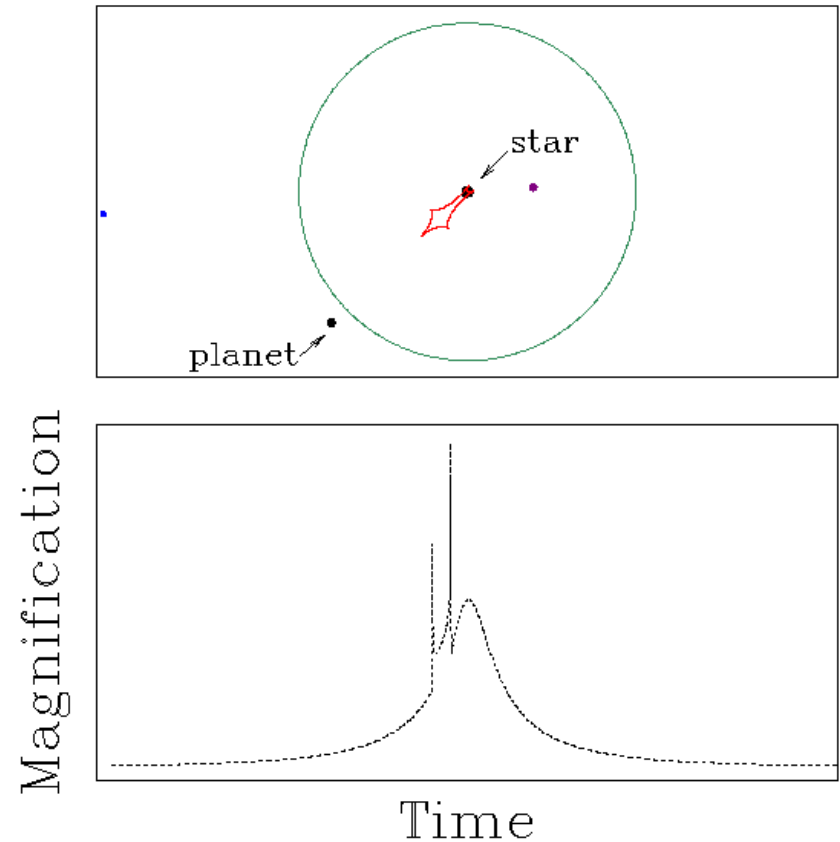
(avec aucun photon du système)

## OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53

$d = 5.2$  kpc;  $0.63 M_{\odot}$ ;  $\sim 2 M_J$  planet at  $\sim 3$  AU



Bond et al. 2004, Ap.J., 606, L155



From S. Gaudi



5 octobre 2024



**7347 planètes**

1276 par vitesses radiales

4474 transitent

308 par microlentilles

1053 par imagerie directe

395 par chronométrage, TTV, astrométrie

**5031 systèmes planétaires**

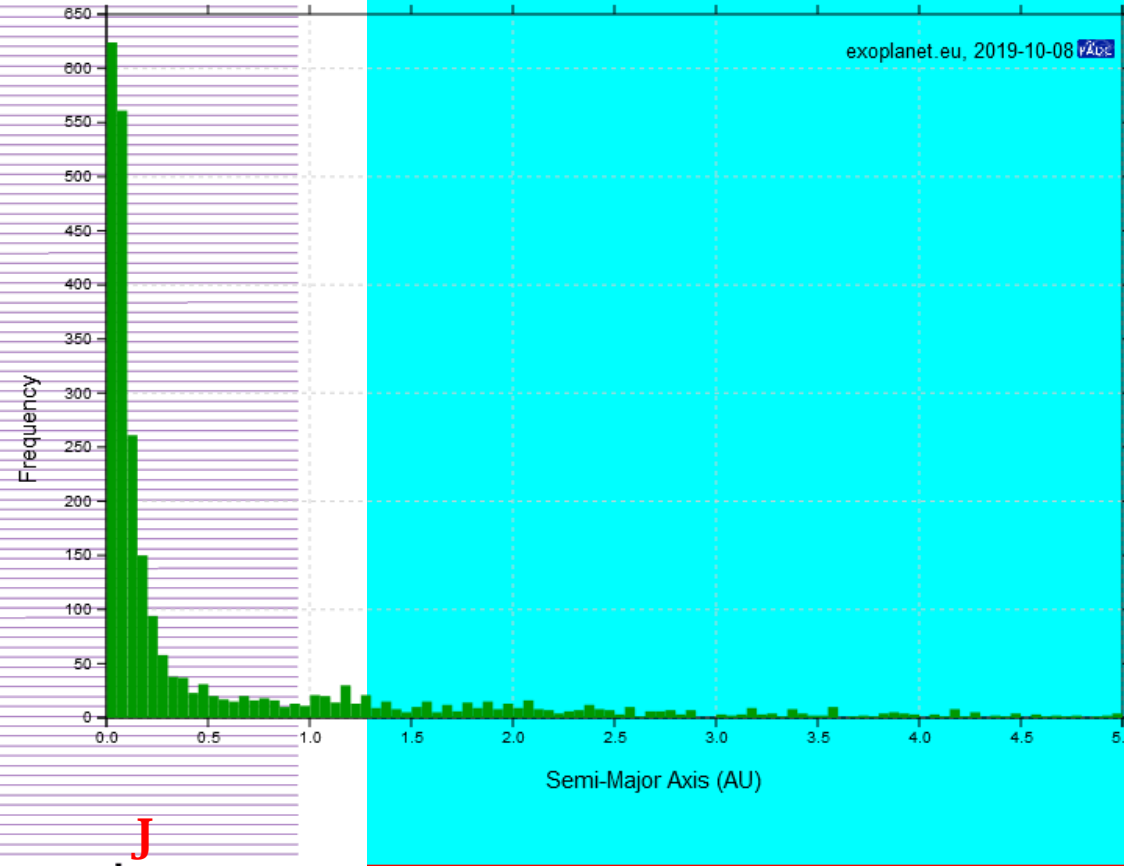
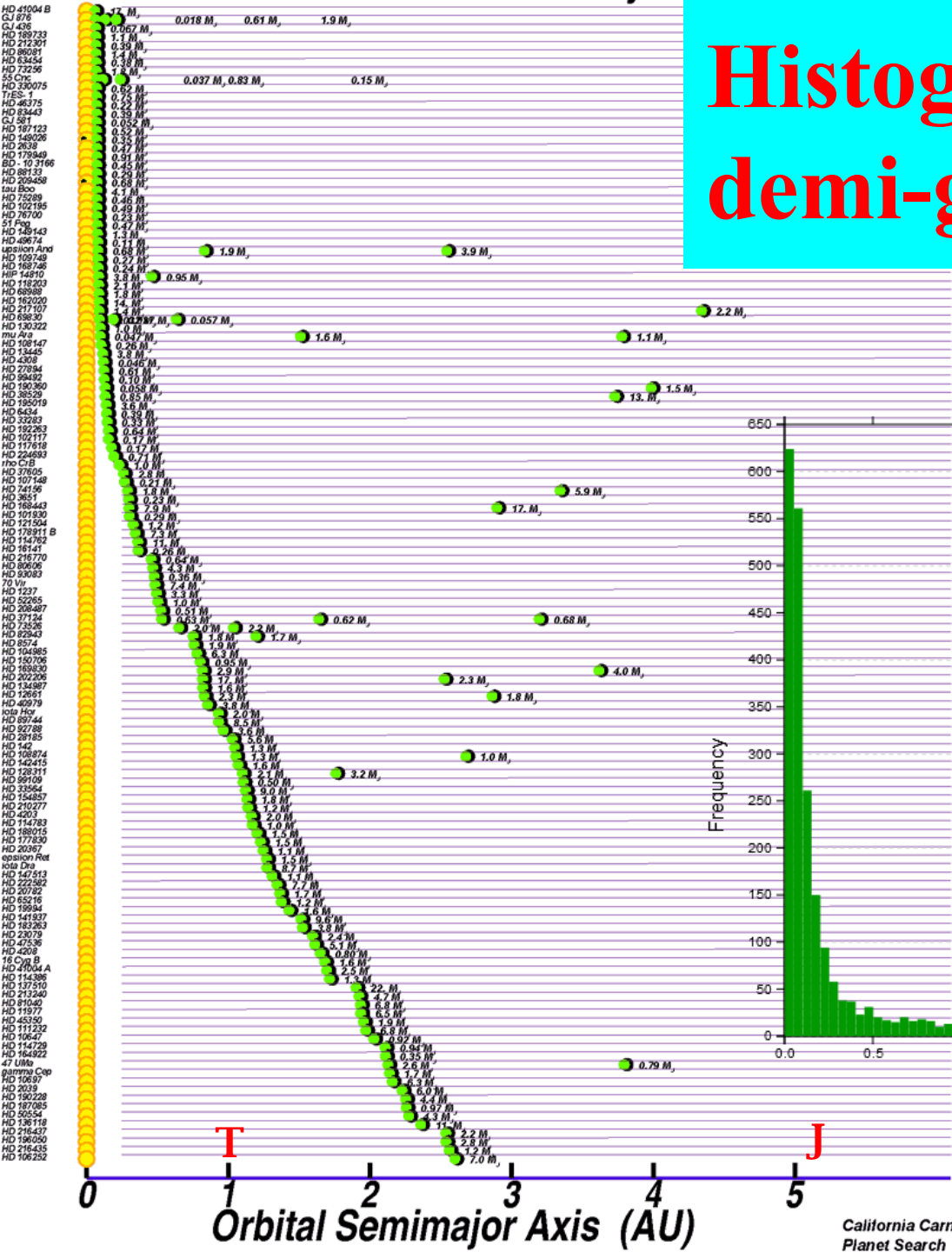
**1020 systèmes multiples**


Extrapolation (statistique) : au moins 1 planète autour de chaque étoile  
très majoritairement plus petites que Jupiter  
~ 30 % de la taille de la Terre

---

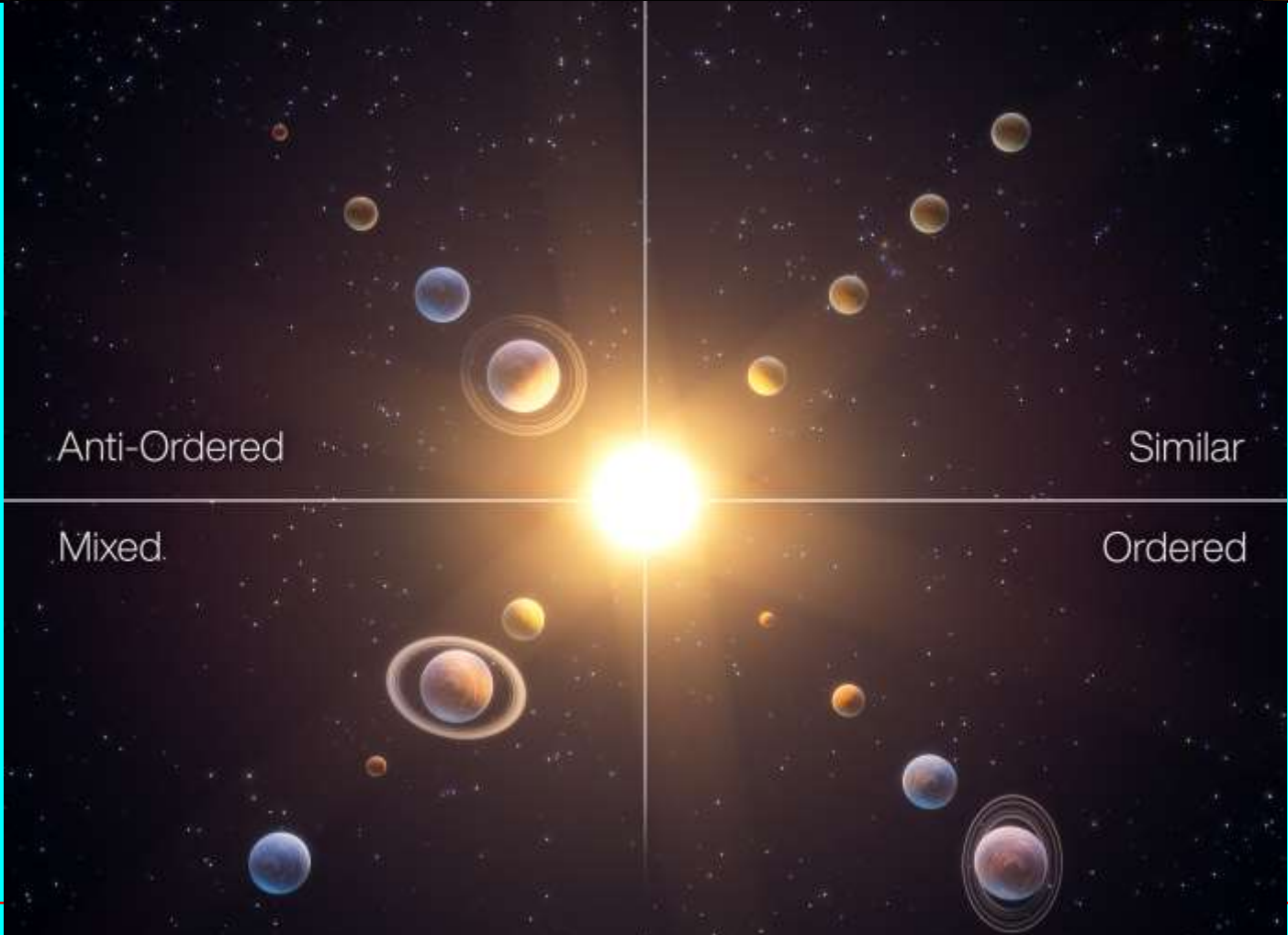


# Histogramme des demi-grands axes



exoplanet.eu, 2019-10-08 

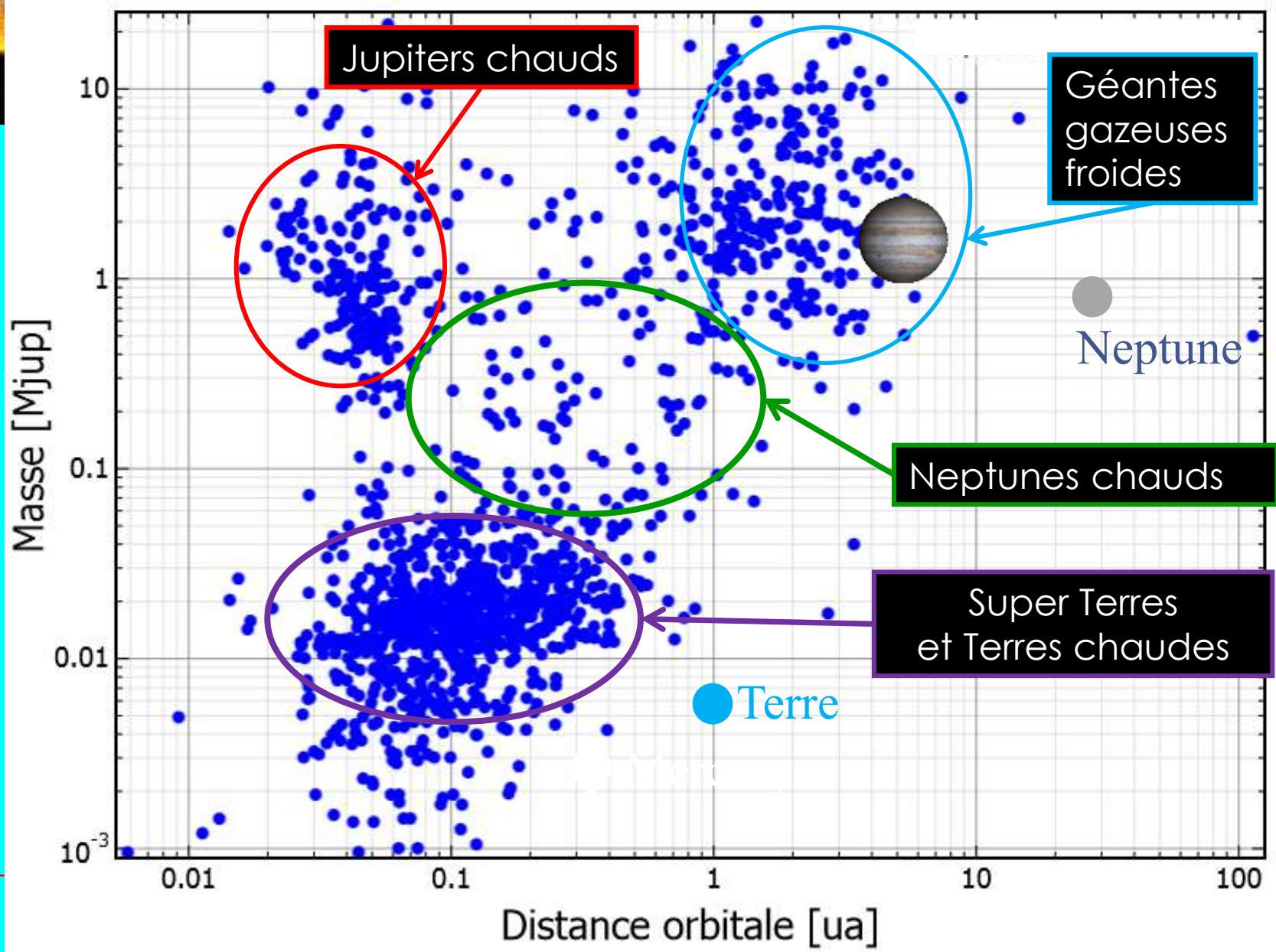
**T** **J**  
Orbital Semimajor Axis (AU)



*Evaporation of Hot-Jupiters*



# Diversité des exoplanètes

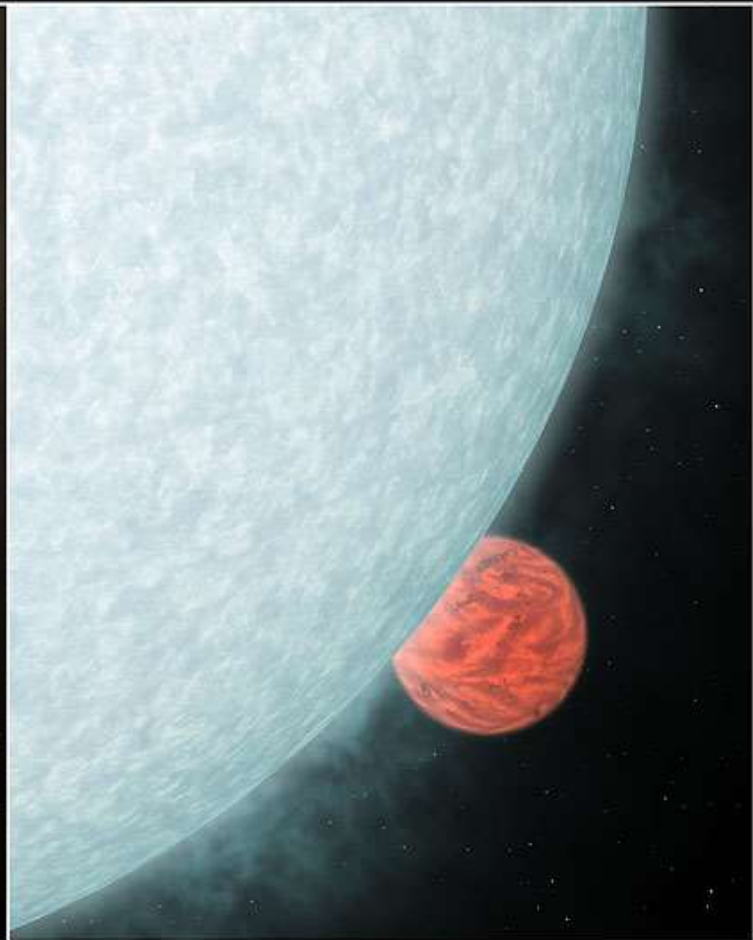


# Transit secondaire

Visible Light



Infrared Light



Extrasolar Planet Eclipse (artist's rendition)

ssc2005-09b



Satellite IR SPITZER  
4.5, 8 et 24 microns

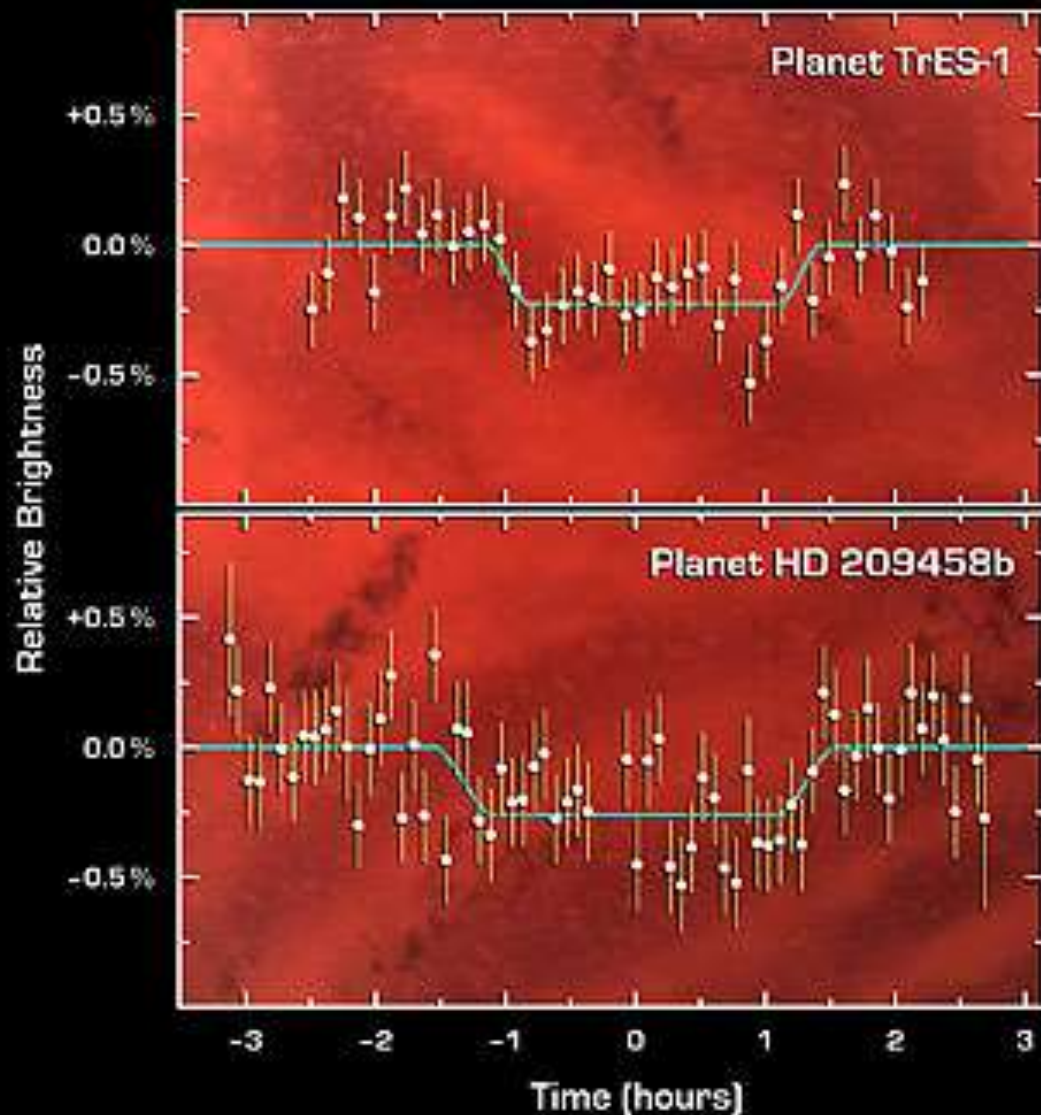
température, albédo

HD209458b et TrES-1 :

$T \sim 800/900 \text{ } ^\circ\text{C}$

55 Cnc-e :  $T \sim \text{élevée}$

(atmosphère très épaisse ?)



Planetary Eclipses Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS

NASA / JPL-Caltech / D. Charbonneau (Harvard-Smithsonian CfA)  
D. Deming (Goddard Space Flight Center)

ssc2005-09a





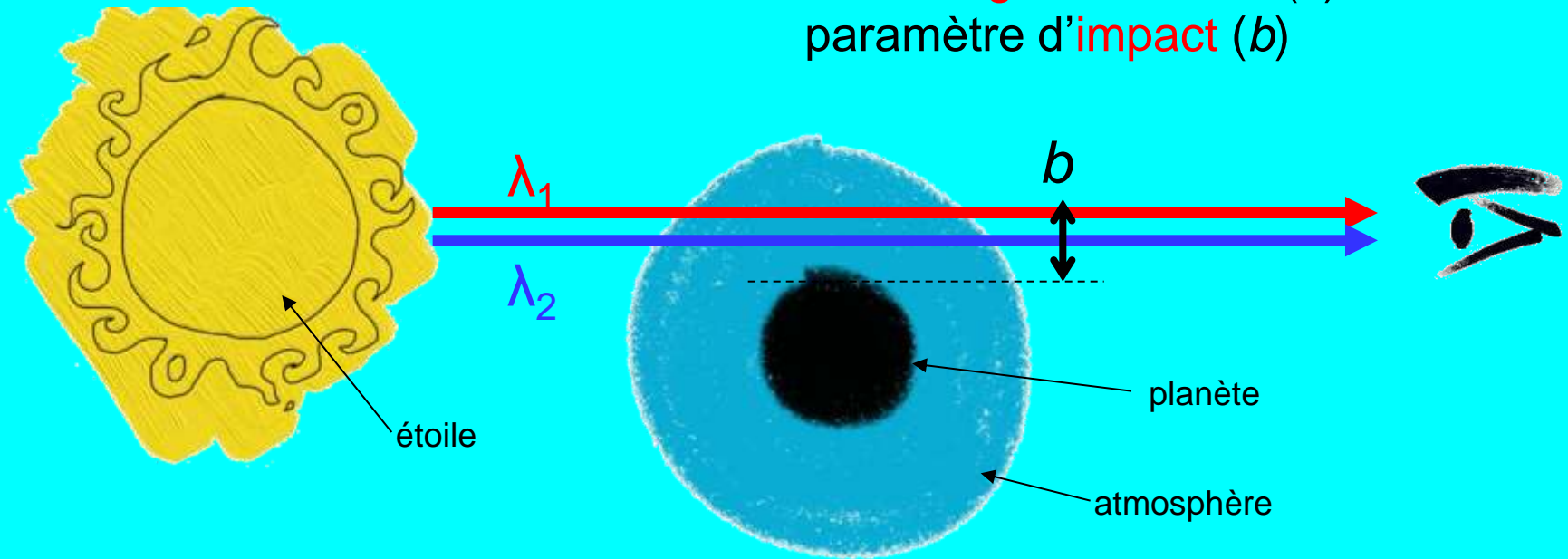
**Atmosphère, atmosphère...**

---



# Spectroscopie des transits d'atmosphères

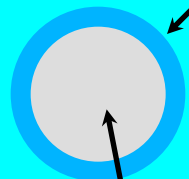
La lumière est absorbée en fonction de la **longueur d'onde** ( $\lambda$ ) et du paramètre d'**impact** ( $b$ )



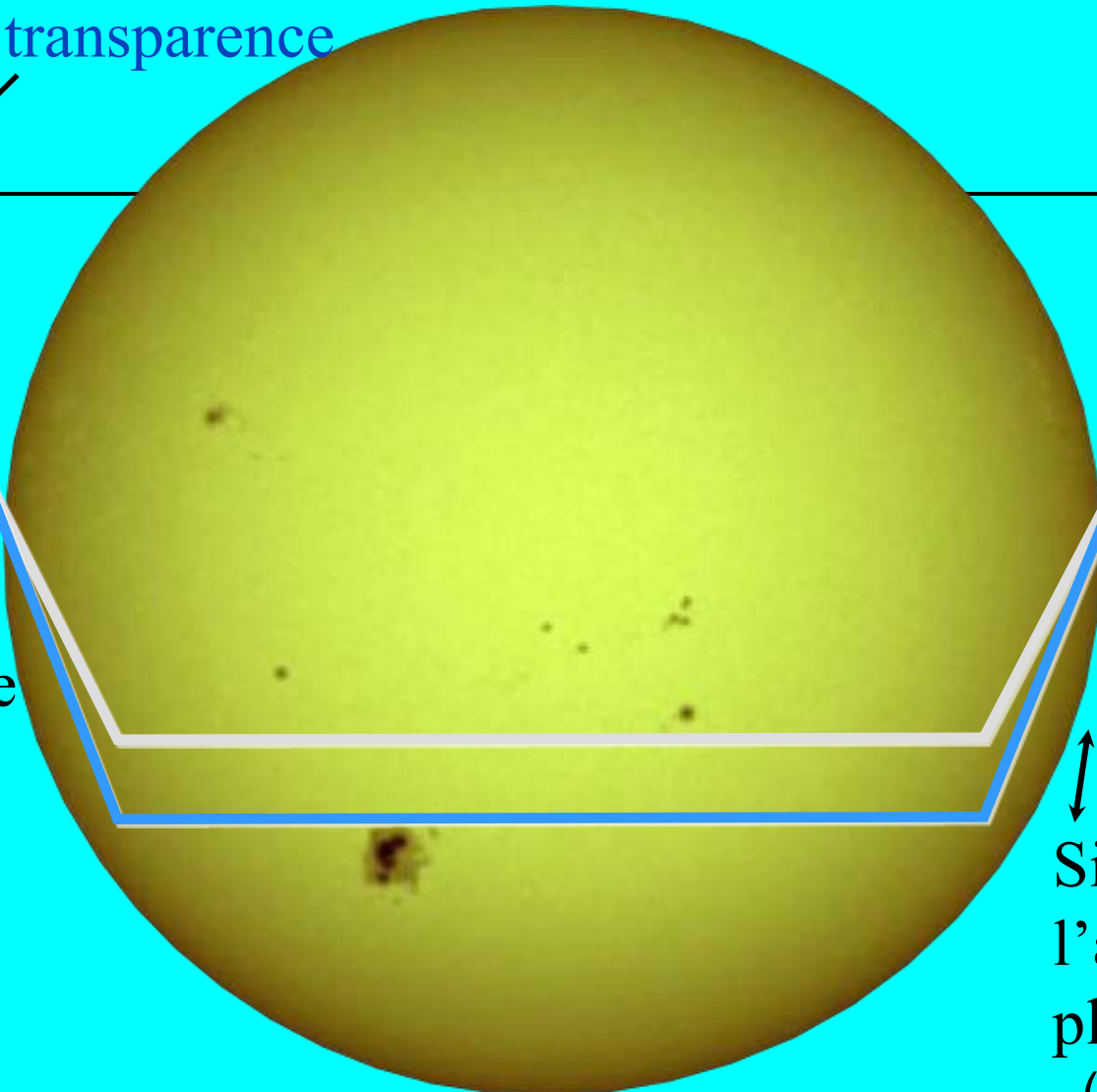
La planète apparaît plus grande quand elle est observée à une longueur d'onde fortement absorbée par l'atmosphère



Atmosphère vue  
par transparence



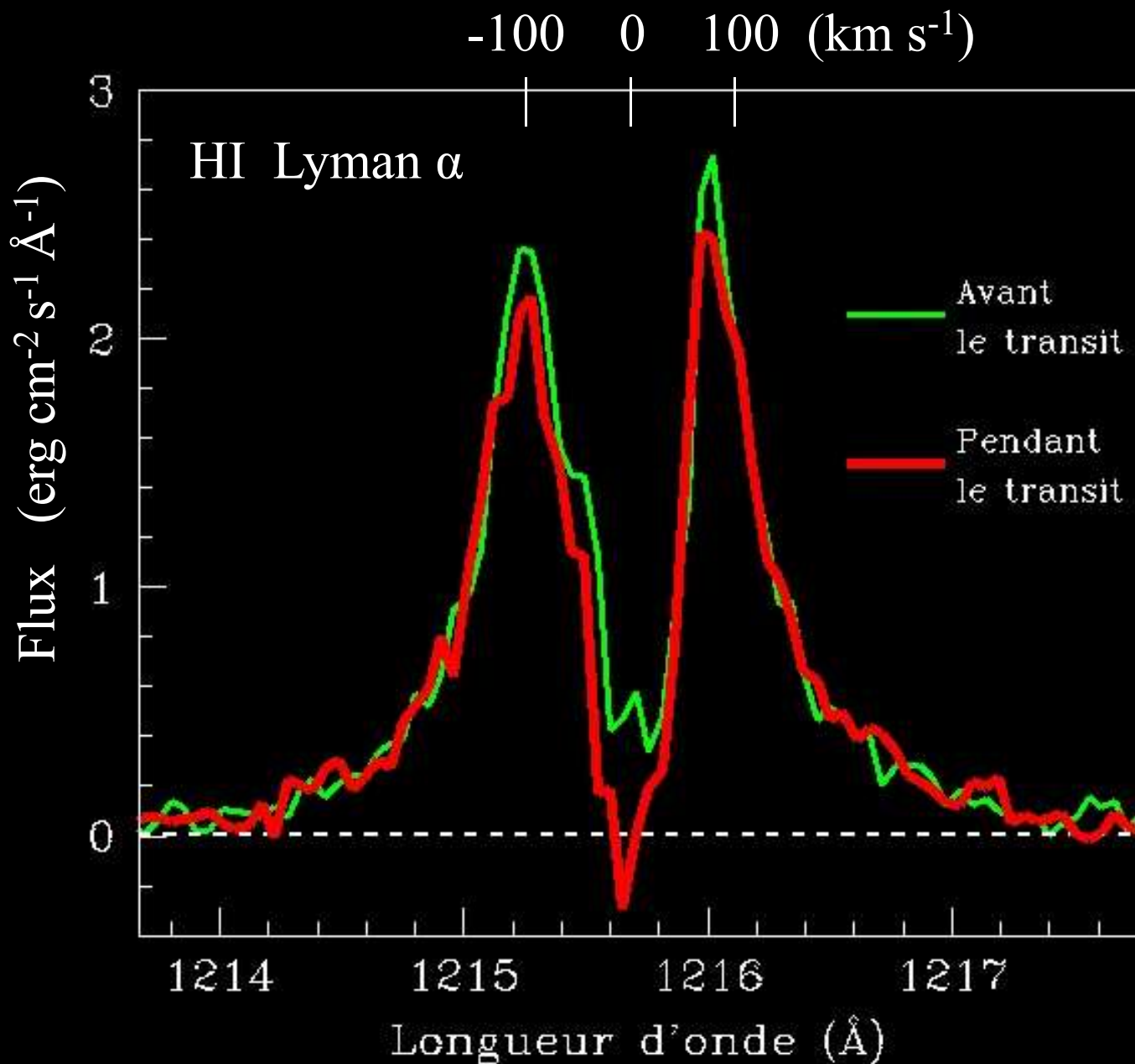
Disque opaque  
de la planète

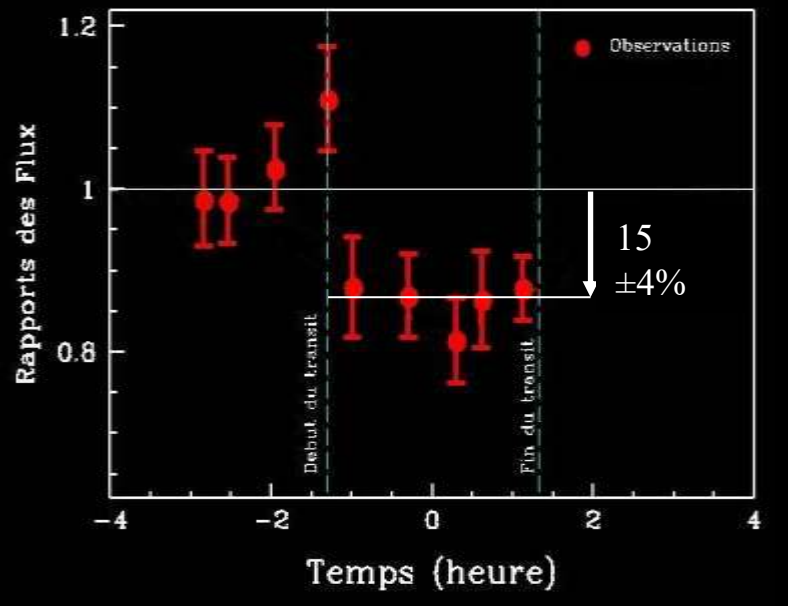


1-2%

Signature de  
l'atmosphère  
planétaire  $\sim 10^{-4}$   
(dépend de  $\lambda$ )

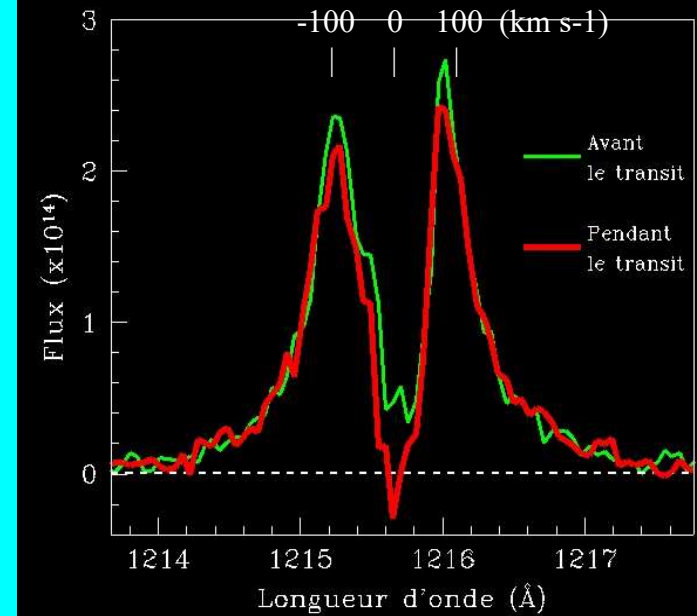
# 1<sup>ère</sup> détection de l'hydrogène





## 2 contraintes

Taux  
d'échappement:  
 $10^{10}$  g/s



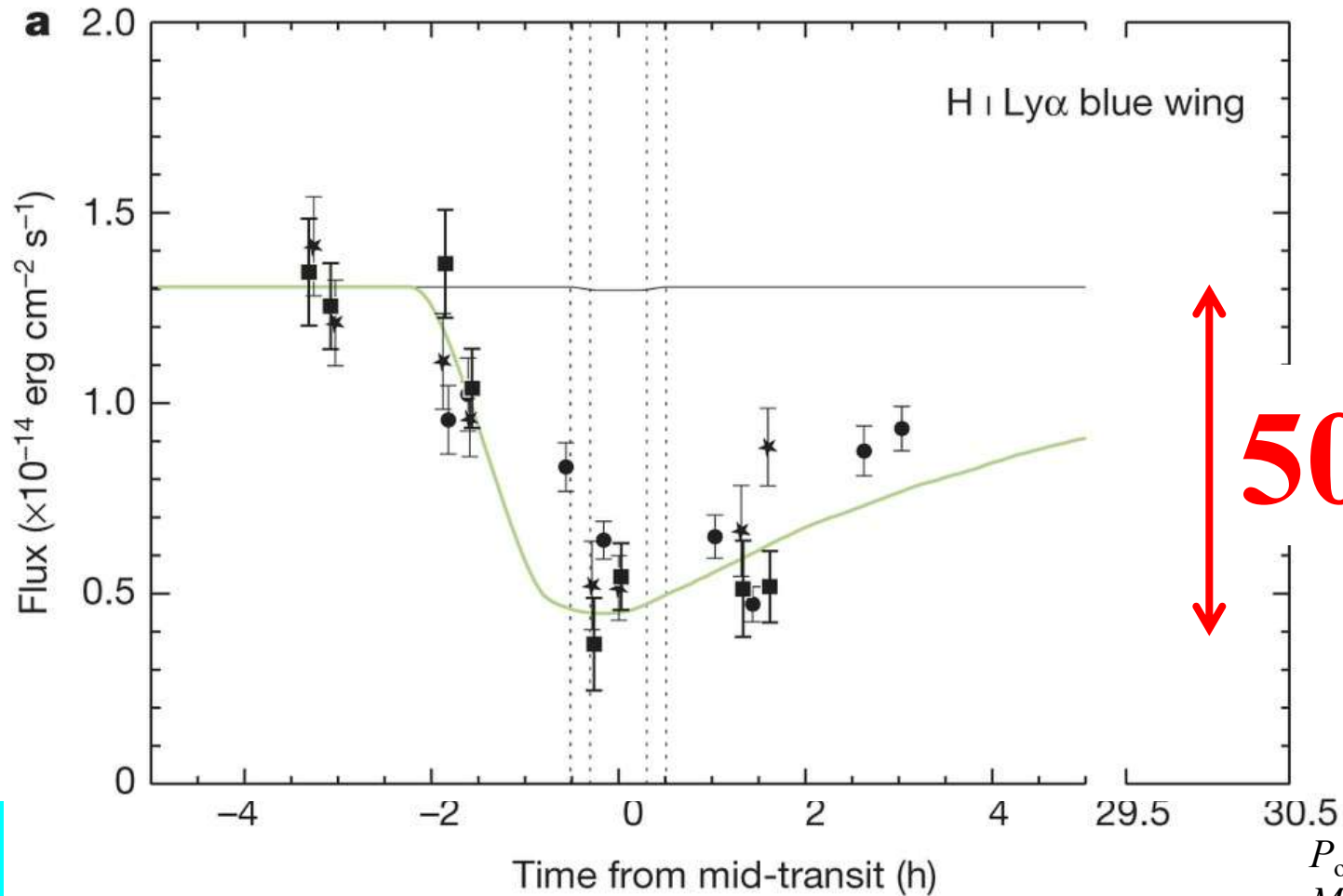
- HD209458b seule ( $1.35 R_{\text{Jupiter}} = 96,500$  km) → 1.6 % absorption
- Lobe de Roche rempli ( $2.7 R_{\text{Osiris}} = 3.6 R_{\text{Jupiter}}$ ) → 10 % absorption
- Hydrogène: 15 % absorption →  $3.2 R_{\text{Osiris}} = 4.3 R_{\text{Jupiter}} = 300\,000$  km
- Au-delà de la sphère d'influence ⇒ **l'hydrogène s'échappe**
- Absorption: de  $-130$  km/s à  $100$  km/s
- $V_{\text{lib}} = 54$  km/s
- Au-delà de la vitesse d'échappement ⇒ **l'hydrogène s'échappe**

**La planète s'évapore**



# Echappement de GJ436b

(Ehrenreich et al., Nature 2015)



50 %

10% de perte de masse depuis la formation

$P_{\text{orb}} = 2,6$  jours  
 $M_p = 23 M_{\text{Terre}}$   
 $R_p = 4,2 R_{\text{Terre}}$

# Détections dans des atmosphères d'exoplanètes

UV

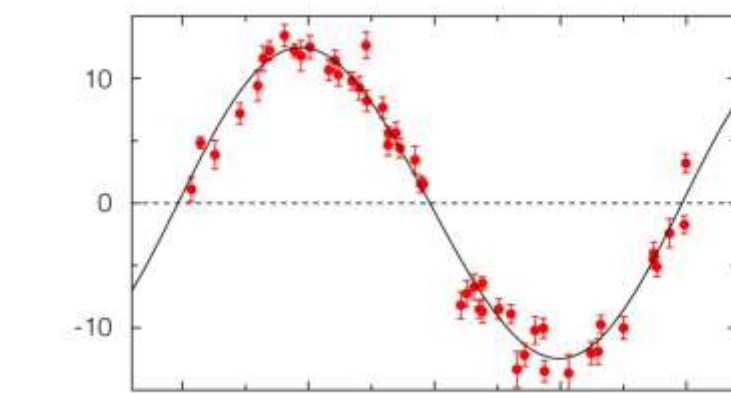
- H I 121.6 nm
- O I 130.5 nm, C II 133.5 nm
- Si IV 139.8 nm
- Si III 140.1 nm
- Mg II 280.0 nm, Mg I 285.3 nm

visible

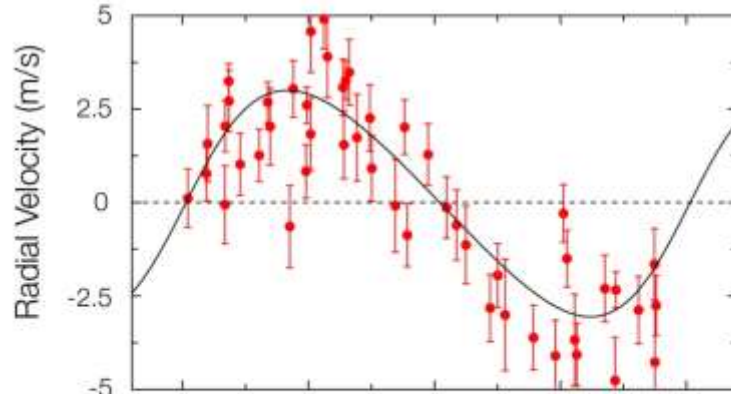
- Rayleigh H<sub>2</sub> 300-500 nm
- Haze (MgSiO<sub>3</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 300-2000 nm
- Na I 589.2-589.8 nm
- K I 768.4 nm
- TiO-VO 600-800 nm

IR

- CH<sub>4</sub> 1.6 - 2.3 - 3.3 - 3.5-8 μm
- H<sub>2</sub>O 1.4 - 6-8 μm
- CO<sub>2</sub> 4 μm
- CO 2.3 - 4.5 μm

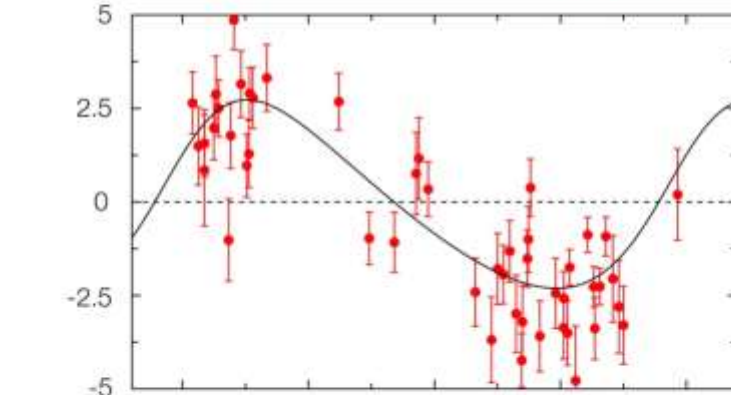


17.8 masses terrestres **b**  
période 5.368 jours



5.6 masses terrestres **c**  
période 12.919 jours

**dans la zone habitable**

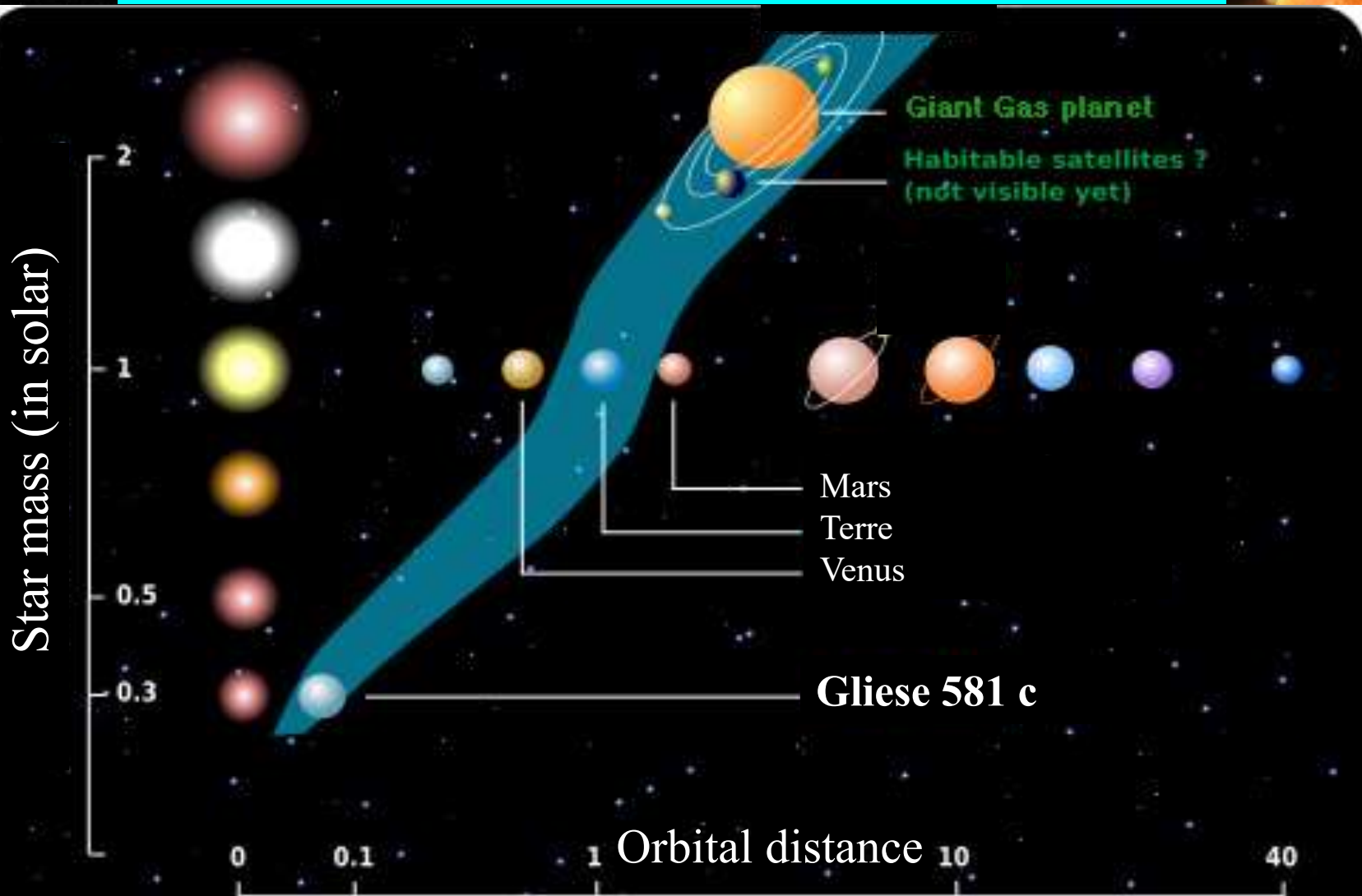


7.7 masses terrestres **f**  
période 83 jours

Observed Velocity Variation of Gliese 581



# Planètes telluriques dans la zone habitable

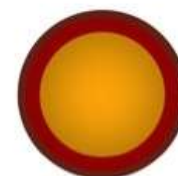
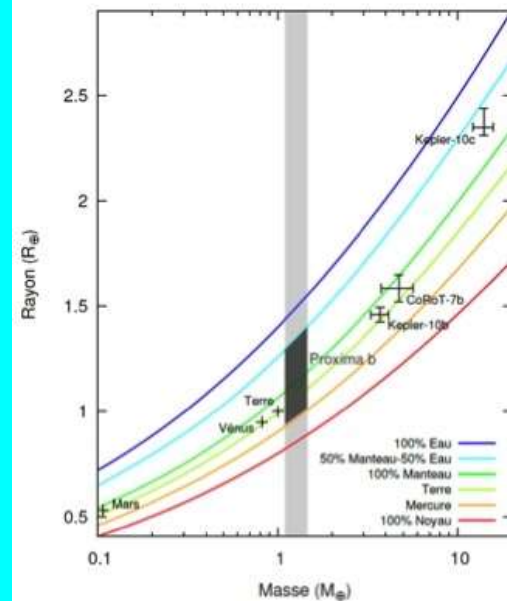
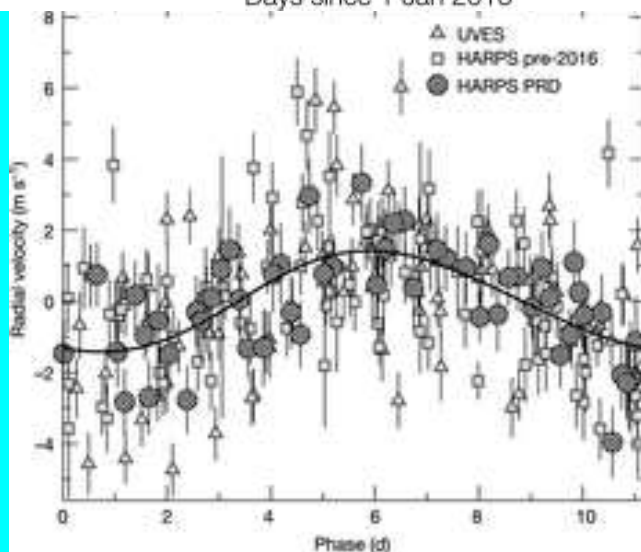
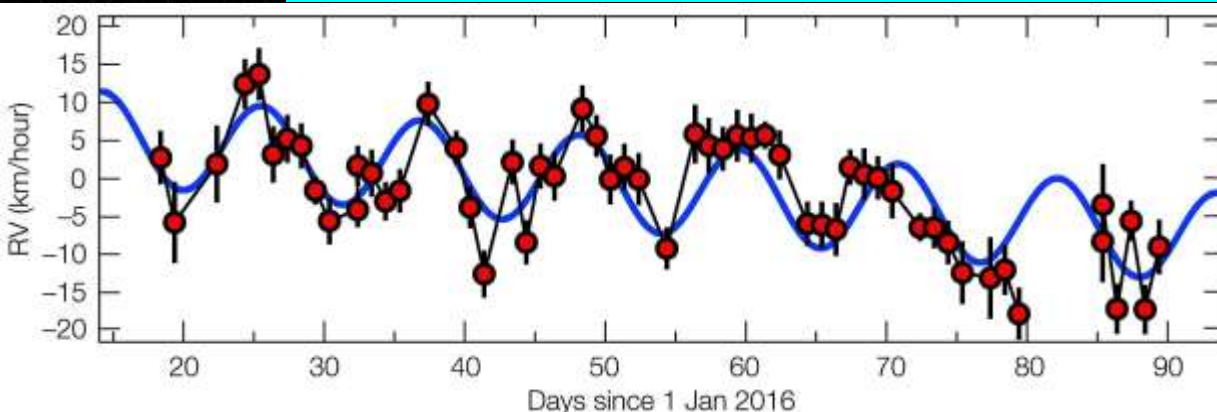






# $\alpha$ Centauri C - b

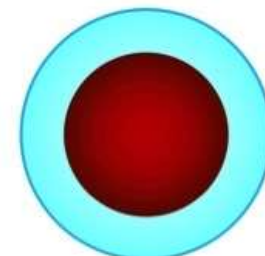
Une planète de masse terrestre à  $\sim 4$  al dans la zone habitable



Proxima b  
Planète rocheuse



Terre



Proxima b  
Planète océan

$M \geq 1,07 M_{\text{Terre}}$

$a = 0,048 \text{ UA}$

$T = 11,186 \text{ jours}$

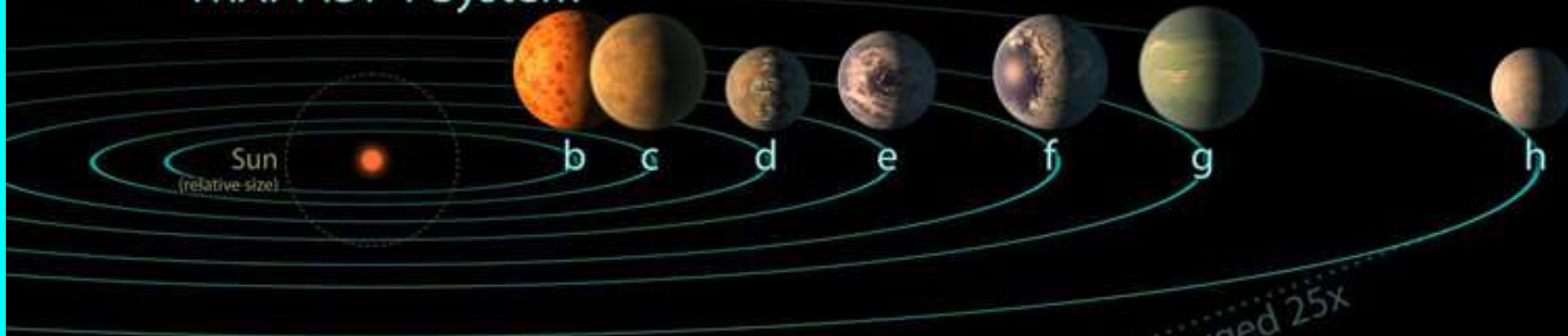
# TRAPPIST-1

(the *TR*Ansiting Planets and Planetesimals Small Telescope)  
**Etoile M avec 7 planètes dont 3 dans la zone habitable**

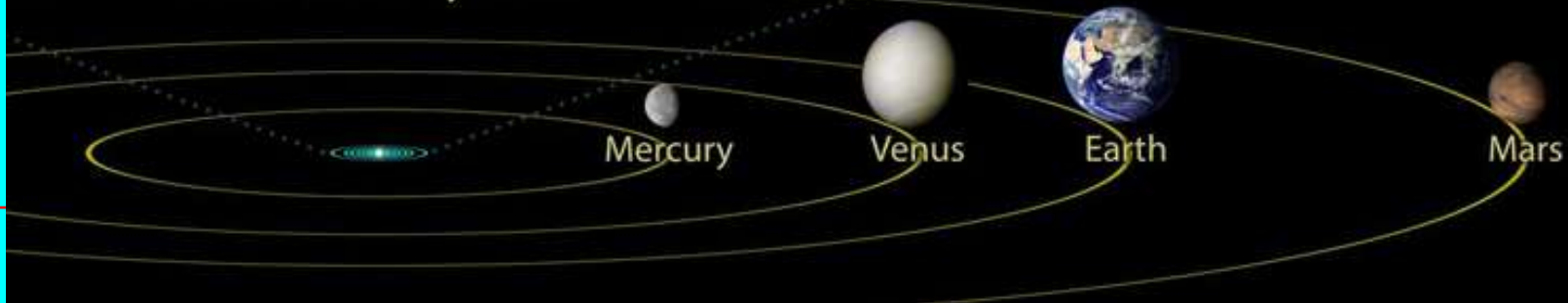
## Jupiter & Major Moons



## TRAPPIST-1 System



## Inner Solar System



# Potentially Habitable Exoplanets

Ranked by the Earth Similarity Index (ESI)



Au moins 30% des étoiles M auraient une planète dans leur zone habitable

A moins d'environ 30 années lumière du Soleil, il pourrait exister environ 4 planètes rocheuses autour d'étoiles G et K, situées dans la zone habitable

Earth  
[1.00]

Jupiter  
[0.12]

Neptune  
[0.18]

[0.87]

[0.86]

[0.84]

[0.84]

[0.77]

[0.73]

Proxima Cen b

TRAPPIST-1 e

GJ 667 C c

Kepler-442 b

GJ 667 C f\*

Kepler-1229 b

NEW

[0.68]

[0.67]

[0.67]

[0.61]

[0.60]

[0.58]

TRAPPIST-1 f

Kapteyn b\*

Kepler-62 f

Kepler-186 f

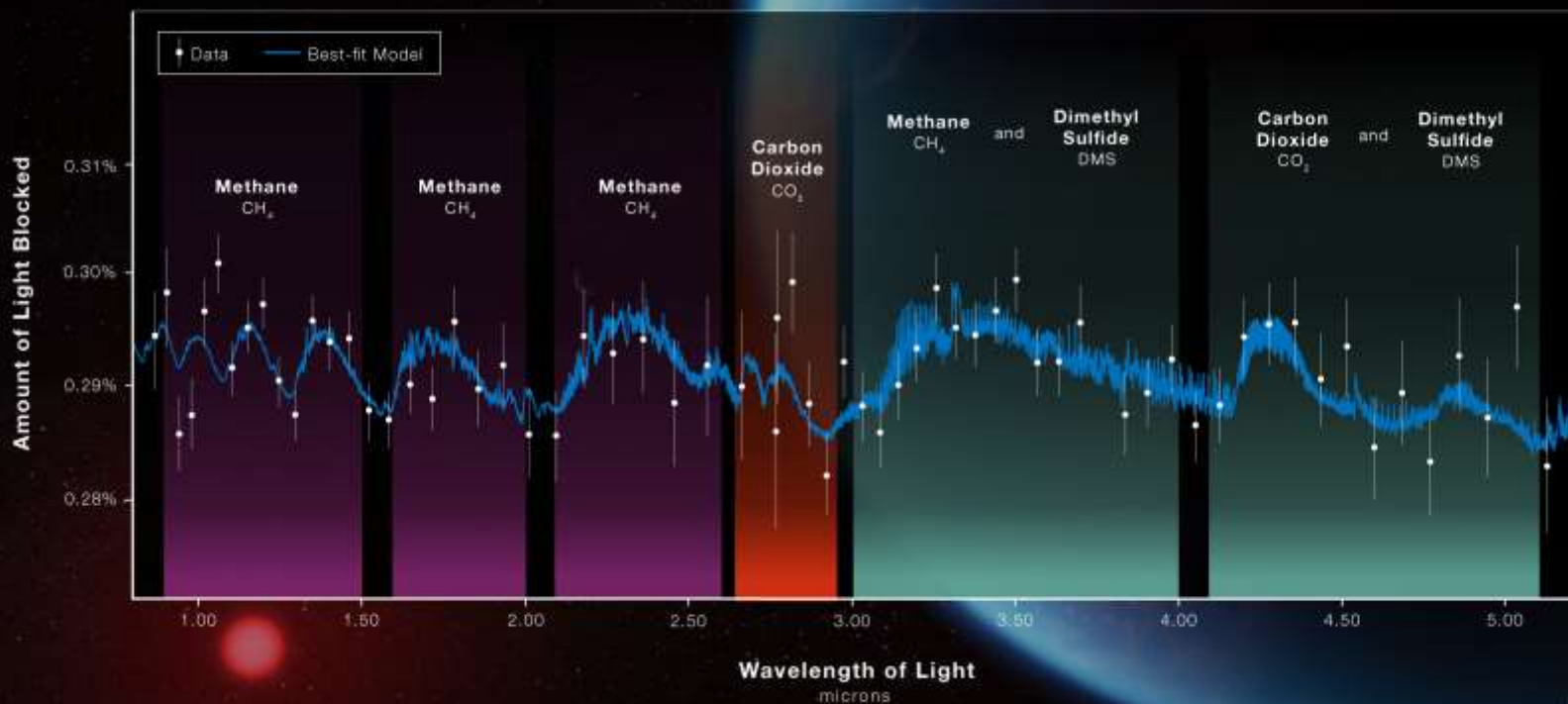
GJ 667 C e\*

TRAPPIST-1 g

EXOPLANET K2-18 b

# ATMOSPHERE COMPOSITION

NIRISS and NIRSpec (G395H)



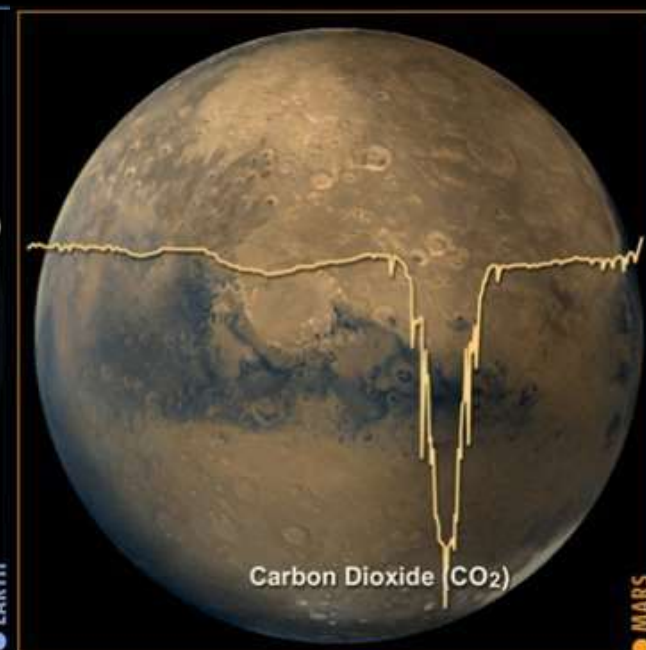
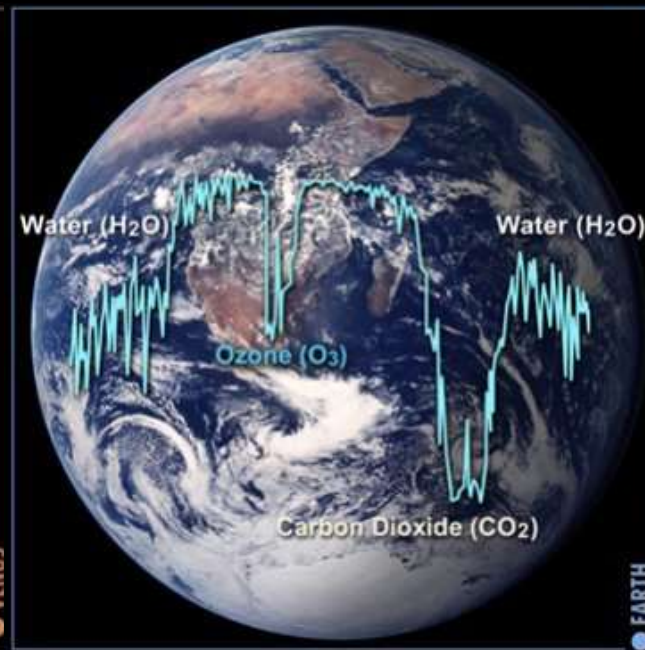
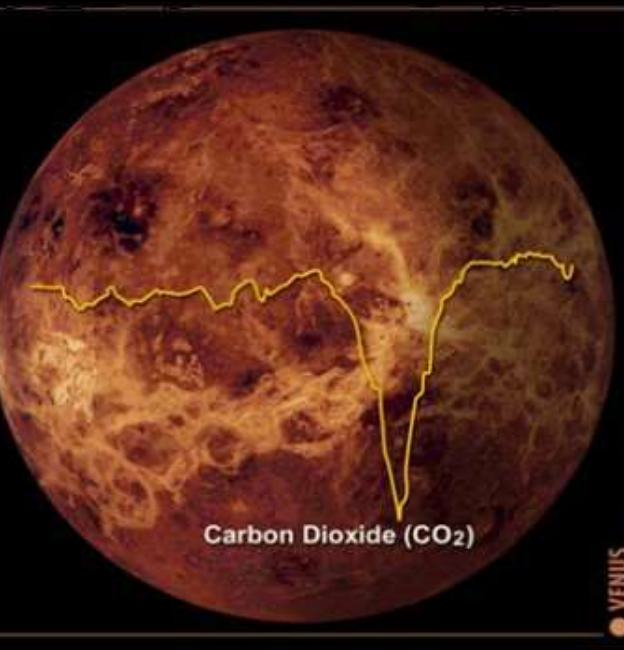
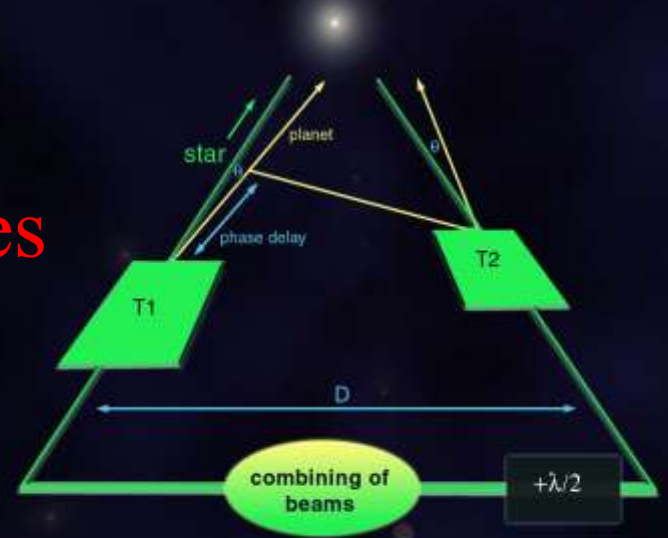
**WEBB**  
SPACE TELESCOPE



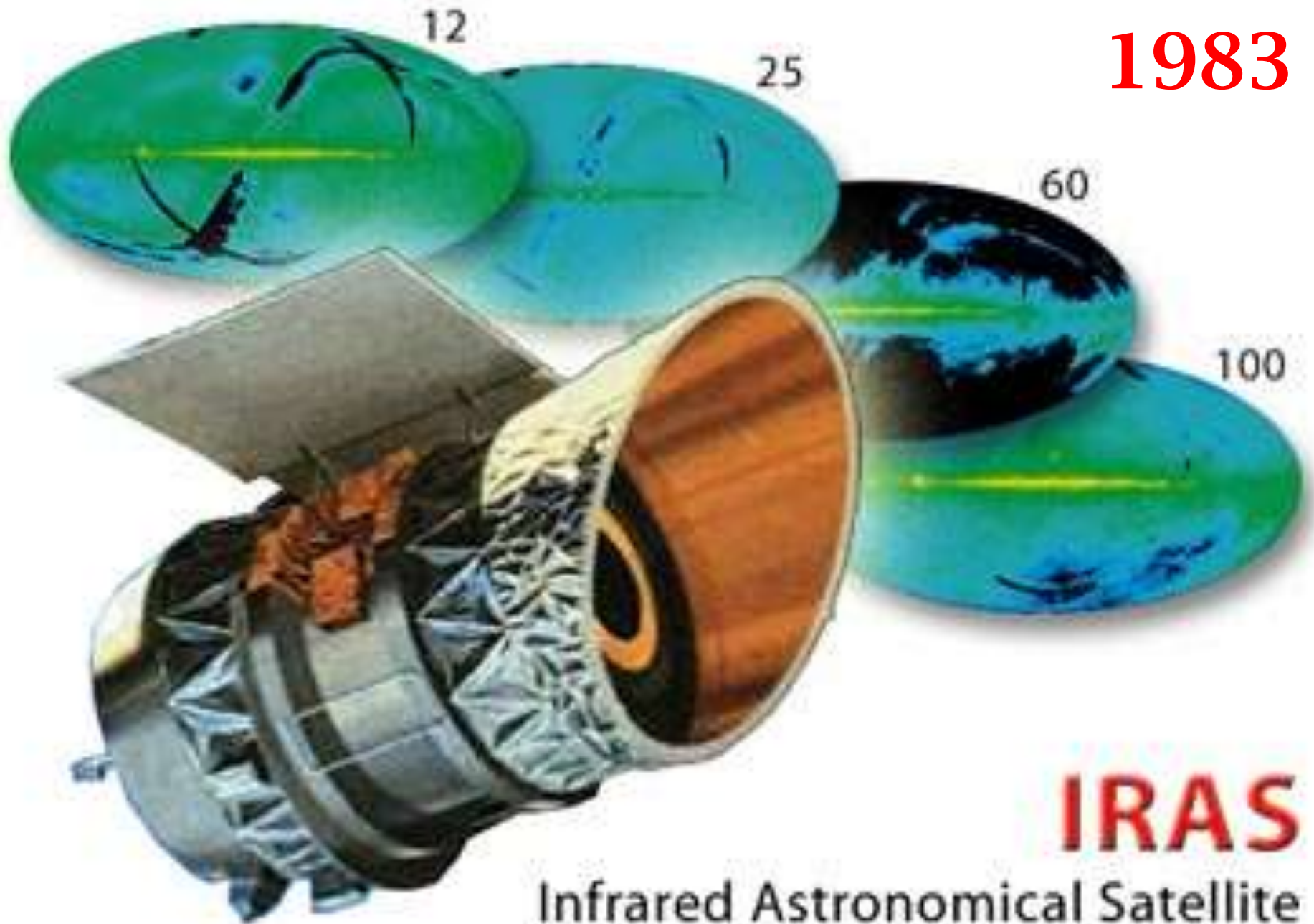


# FUTUR : Bio-signatures

## Images et spectres de planètes telluriques



1983



**IRAS**

Infrared Astronomical Satellite



25 arcsec

500 AU

Smith & Terrile 1984



# Le spectre de $\beta$ Pictoris

Type A5V, jeune ( $\sim 20$  millions d'années)  
brillante ( $V = 3.85$  -  $d = 63$  a.l.)

## Raie d'absorption du Ca II

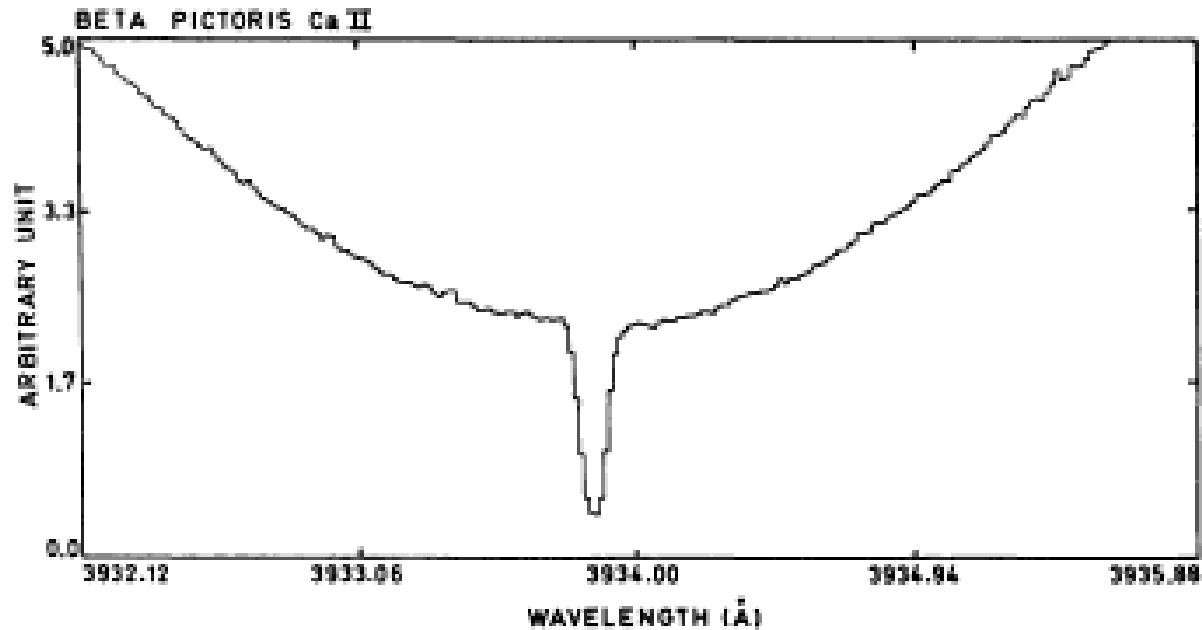


Fig. 3. The central part of the Ca II K line of  $\beta$  Pic in October 1984



# Le système $\beta$ Pictoris

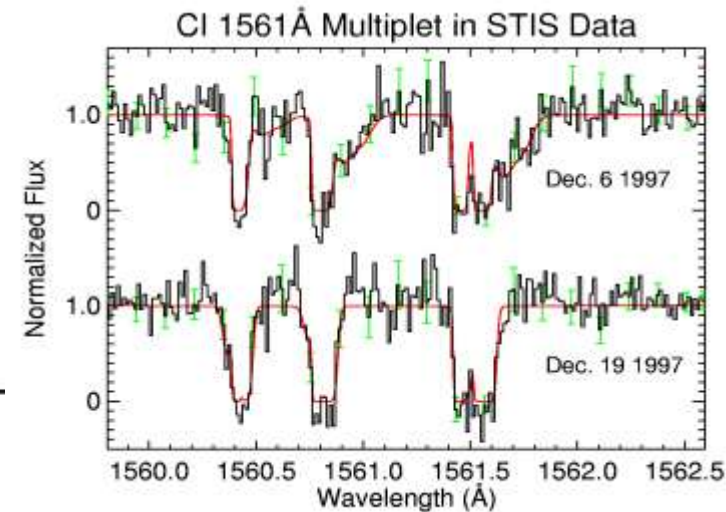
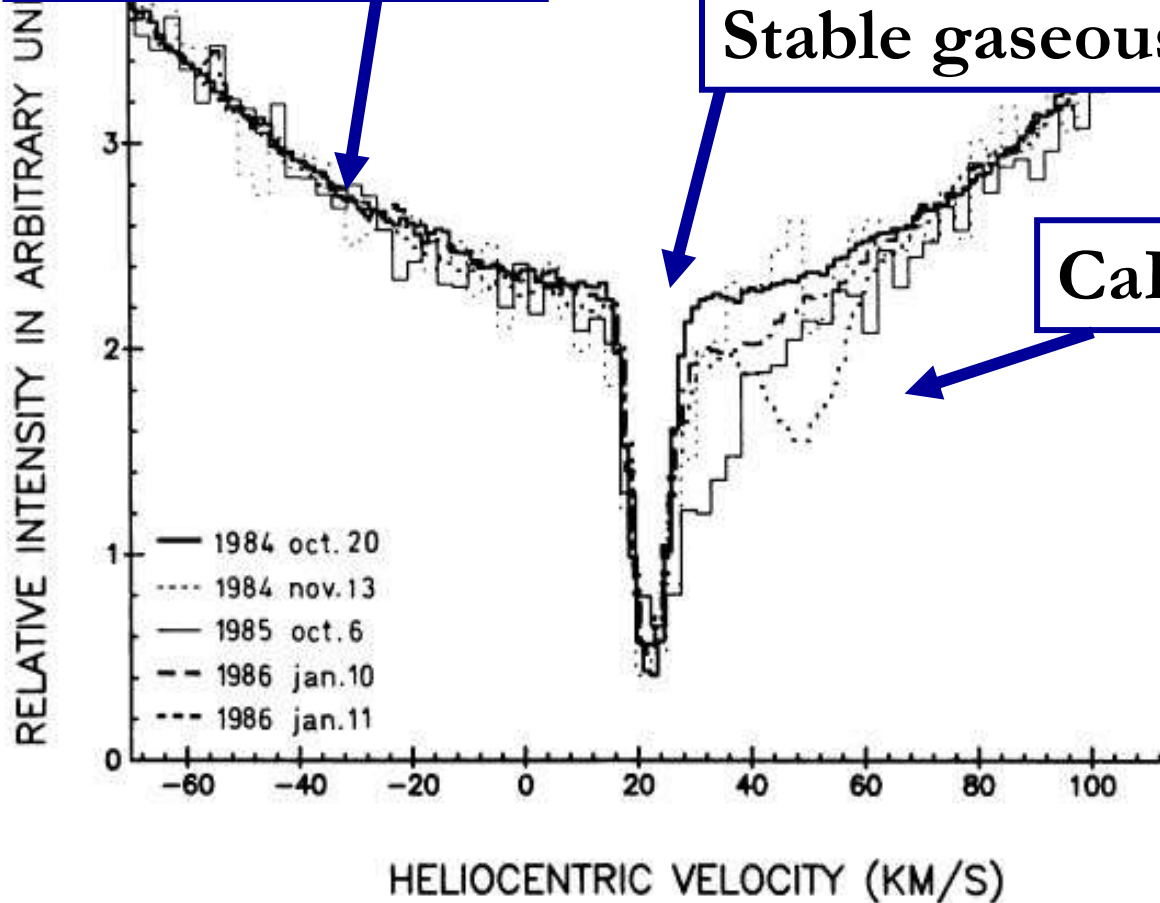
Disque de débris [ gaz + poussière ] edge-on  
Ferlet et al. 1987

268

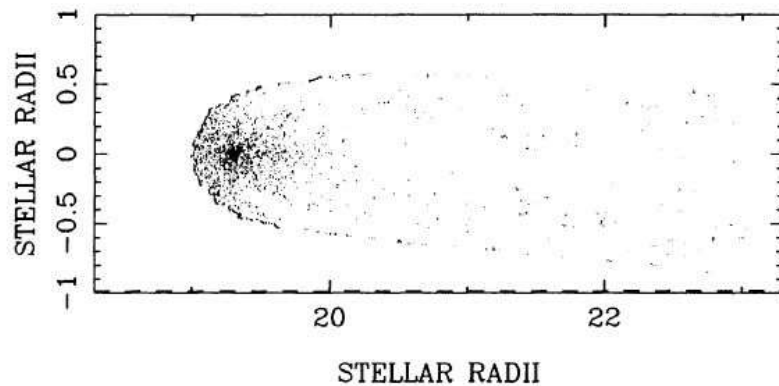
Stellar CaII line

Stable gaseous disk

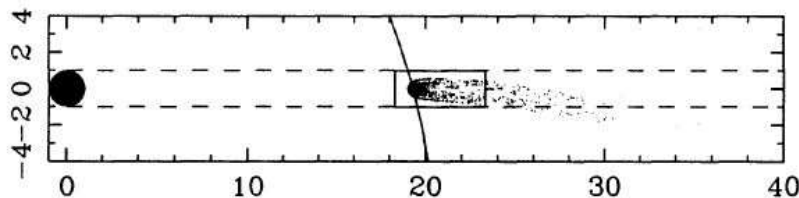
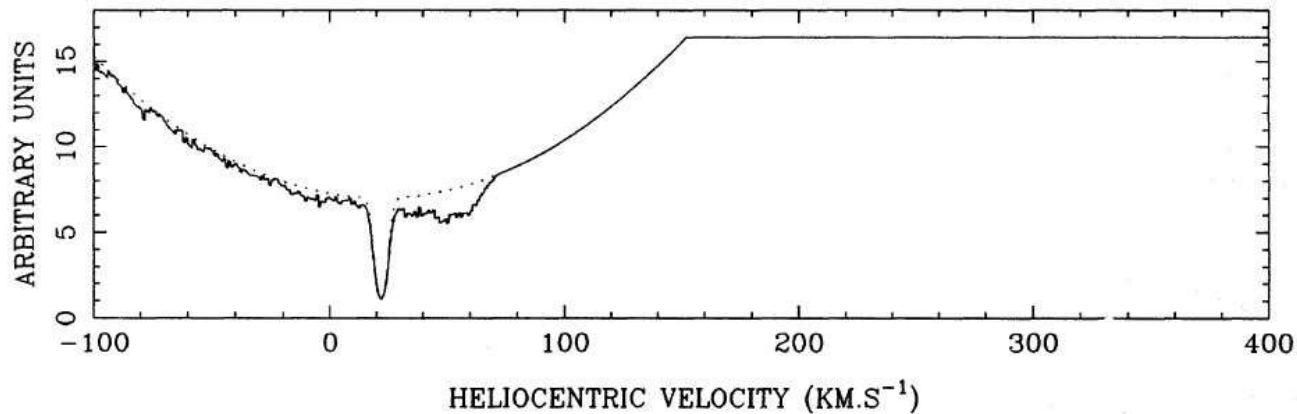
CaII variable absorptions



# Simulation numérique de “Falling Evaporating Bodies”



$z$  at 1 A.U. =  $15.0 \cdot 10^{33} \text{ s}^{-1}$   
 $dm/dt = 0.010 \cdot 10^{10} \text{ kg s}^{-1}$   
outflow velocity =  $10.0 \text{ km s}^{-1}$   
 $s_0 = 1. \mu\text{m}$   
 $q = 18.0 R_*$   
 $\Phi = -150.0^\circ$   
proportion  $\text{H}_2\text{O} : 80.0\%$

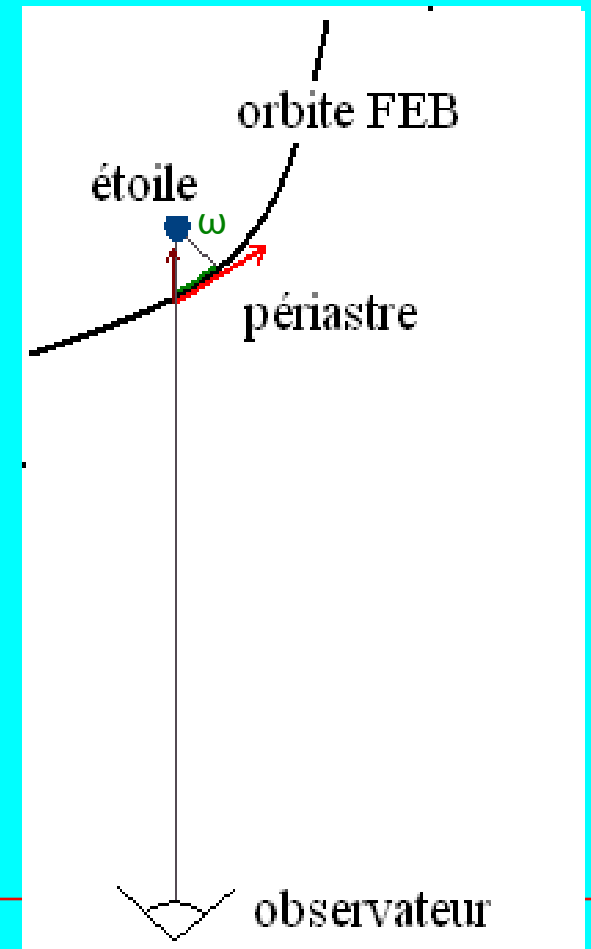
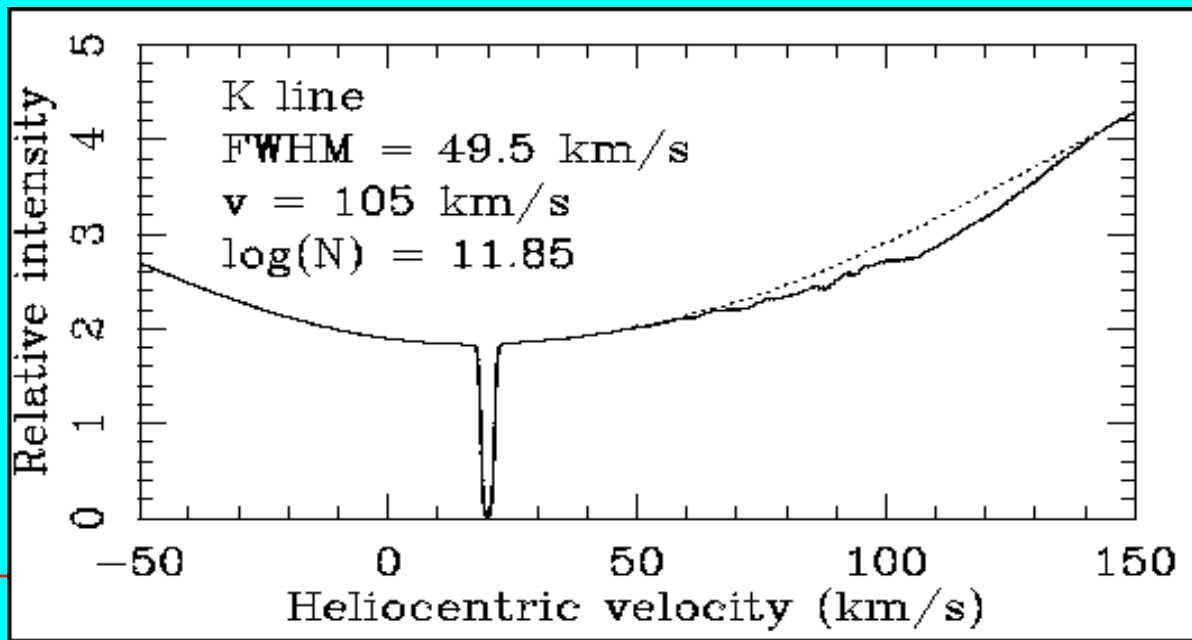



Ion : CaII

$t = 22^{\text{H}}30 \text{ min. } 0 \text{ s.}$


# Simulations numériques de FEBs en transit

- Grand périastre  
→ Petites vitesses & raies étroites
- Petit périastre  
→ Grandes vitesses & raies larges





# Simulation numérique de comètes en chute



Ce scénario explique :

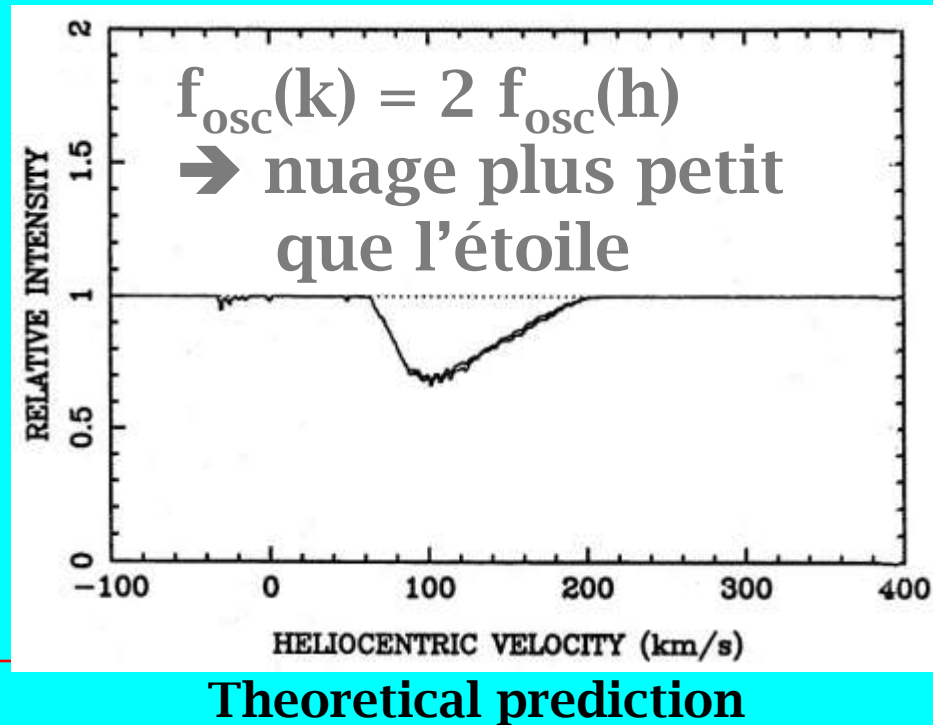
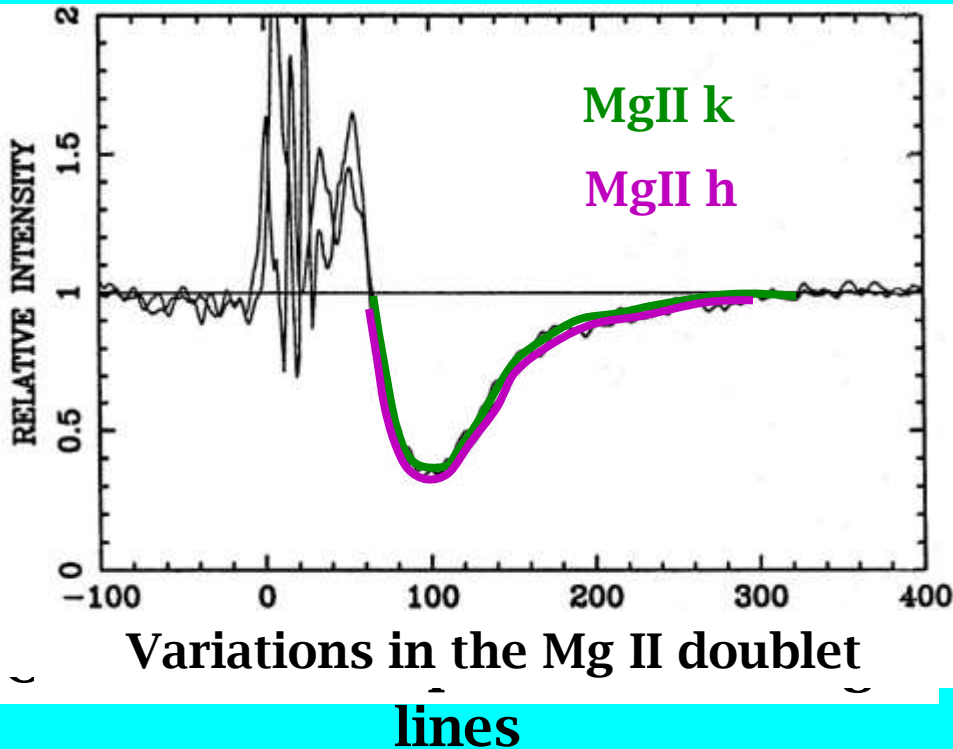
- Vitesses radiales du gaz en chute (jusqu'à 400 km/s)
  - Variabilité et échelles de temps
  - Tailles
  - Température du gaz chaud
  - Espèces très ionisées (e.g.  $\text{Al}^{++}$ ,  $\text{C}^{+++}$ )
-



# Confirmation du scénario avec HST

Vidal-Madjar, Ferlet et al. (1994)

- Beaucoup de raies détectées dans l'UV (FeII, MgII, CrII, ZnII, AlIII, CIV etc.)
- e.g., le doublet MgII → le nuage de gaz est plus petit que l'étoile



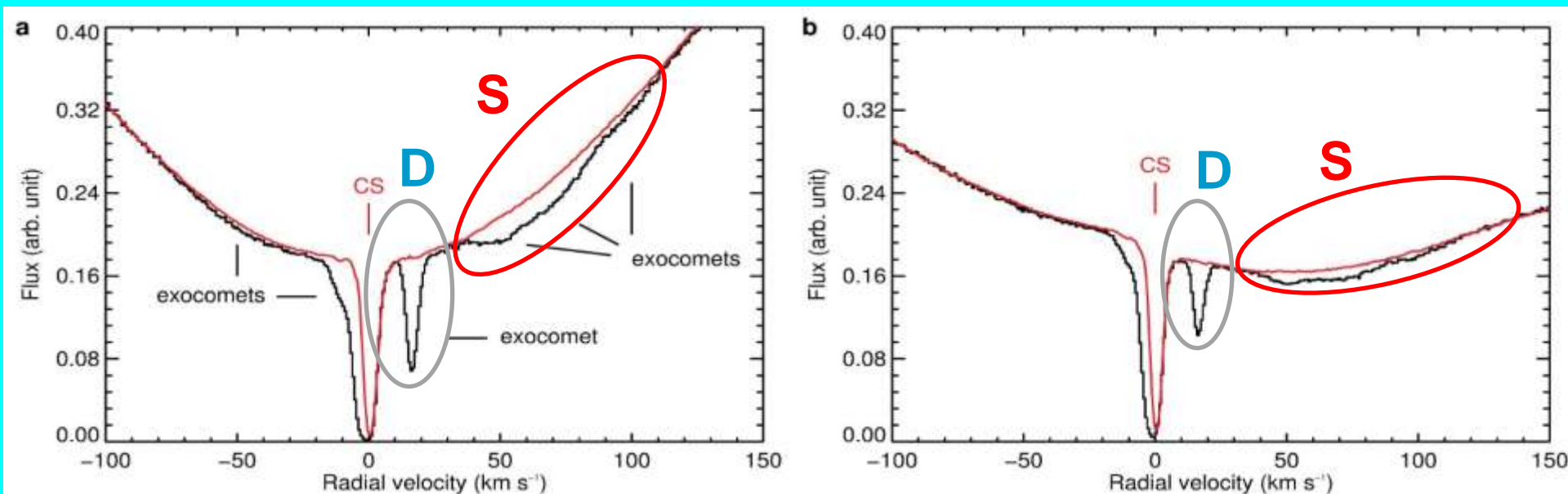
# Deux familles d'exocomètes dans le système de $\beta$ Pictoris

Détection simultanée dans deux raies de  $\text{Ca}^+$  (HARPS)

Analyse statistique de plus de 1000 spectres  $\rightarrow$   $\sim$  500 exocomètes

Raie Ca II K

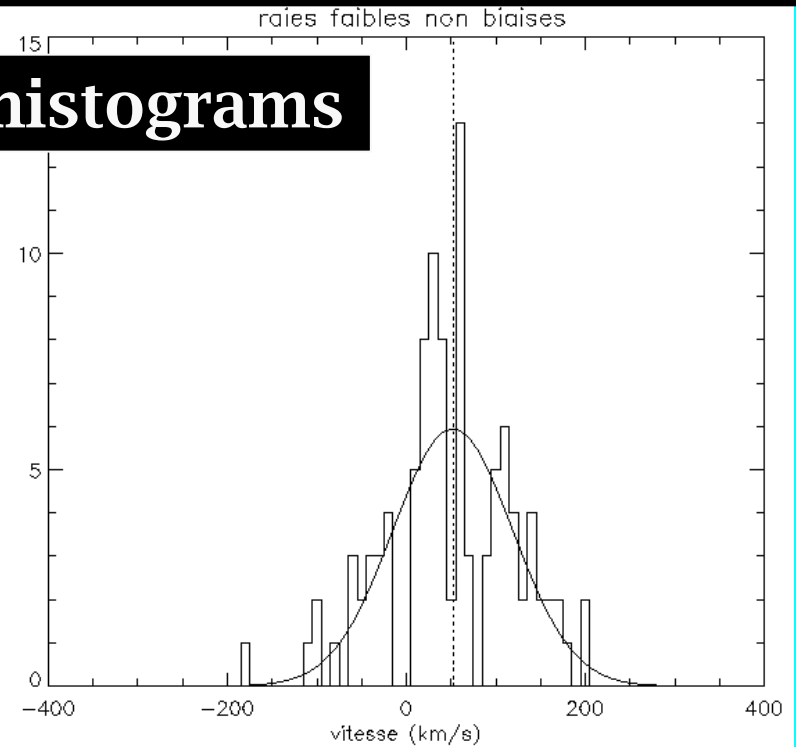
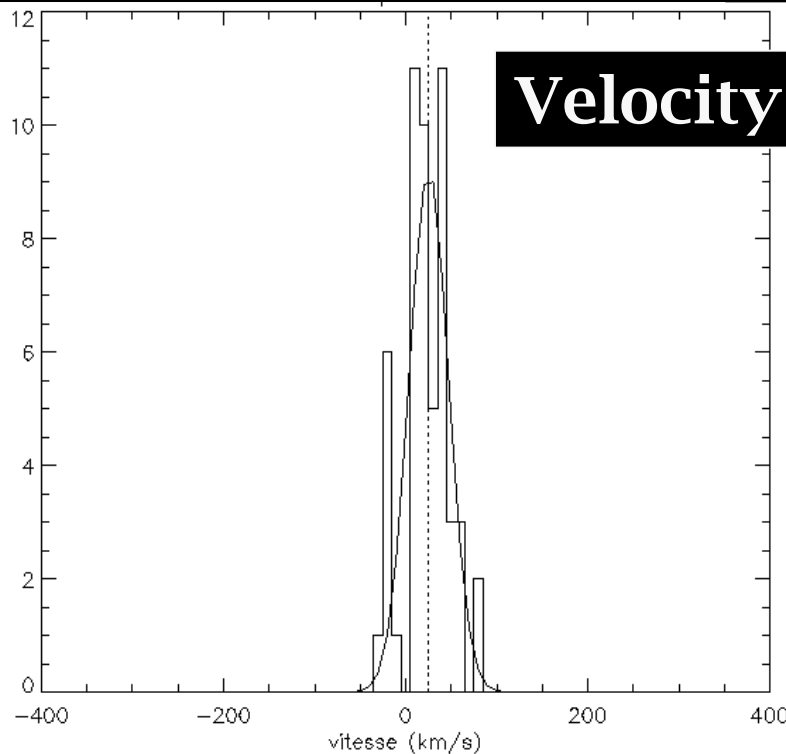
Raie Ca II H



# Deux familles d'exocomètes dans le système de $\beta$ Pictoris

Deep Lines

Shallow Lines



Velocity histograms

Position ( $\text{km s}^{-1}$ )

Deep lines

$25 \pm 5$

Shallow lines

$48 \pm 5$

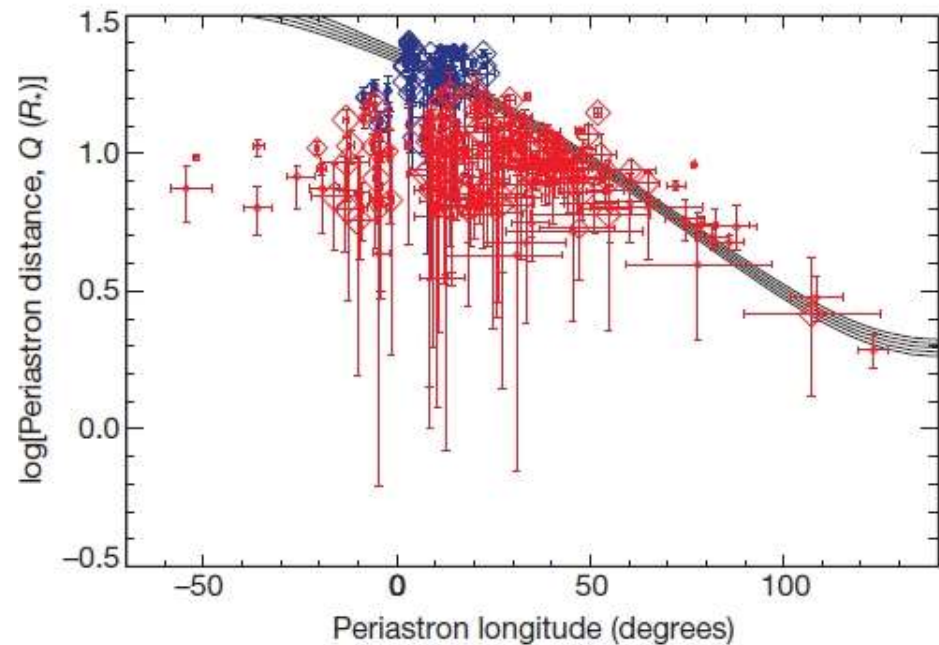
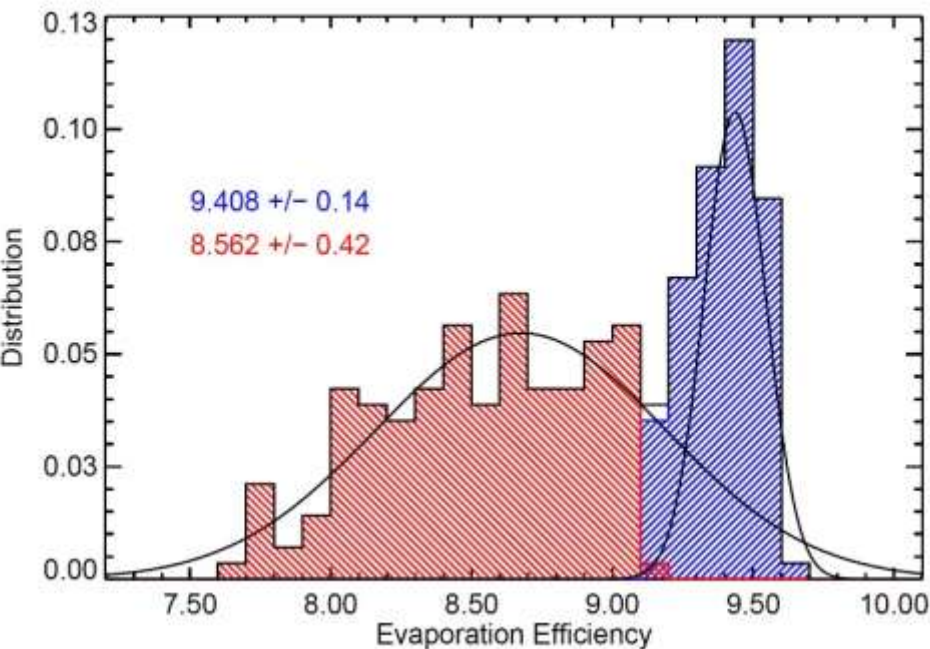
FWHM ( $\text{km s}^{-1}$ )

$21 \pm 2$

$70 \pm 7$

# Deux familles d'exocomètes dans le système de $\beta$ Pictoris

- Une famille de comètes jeunes sur une orbite unique, produite par la récente dislocation d'un (ou très peu) corps plus gros (famille D en bleu)
- Une famille de comètes plus anciennes sur des orbites en résonance avec une planète massive (famille S en rouge)





# Détection d'exocomètes

Comète = petit corps avec une signature d'évaporation (*sublimation de volatiles sur des corps en orbites excentriques*)

→ Des petits corps extrasolaires peuvent être détectés quand ils deviennent des comètes

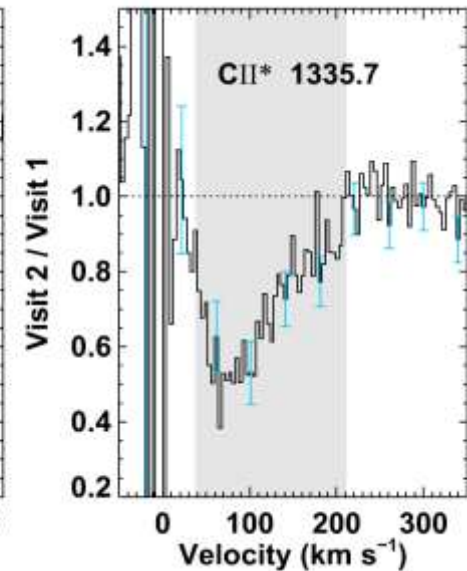
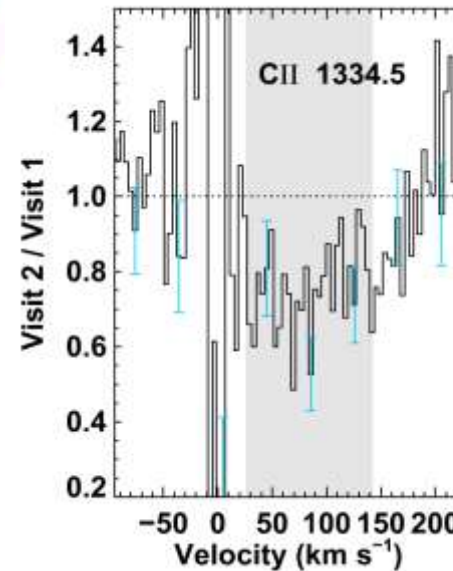
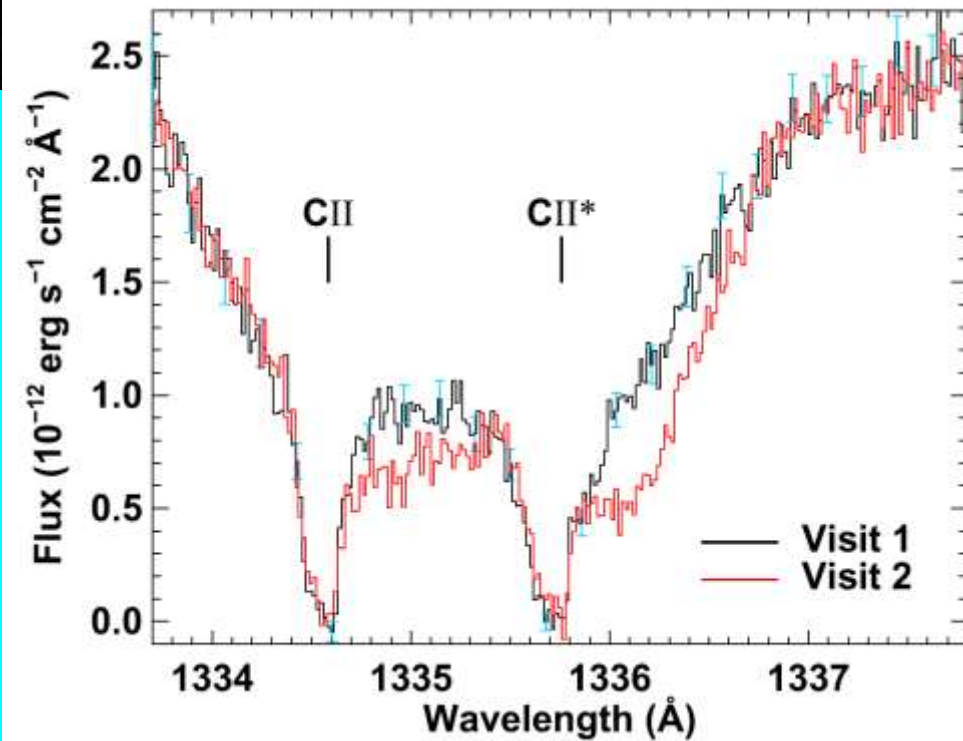
Détection de la coma et/ou de la queue cométaire  
(plusieurs millions de km)

**grâce au transit**

Deux composantes: **la coma gazeuse** (spectroscopie)  
**la queue poussiéreuse** (photométrie)



# Exocomètes de 49 Ceti

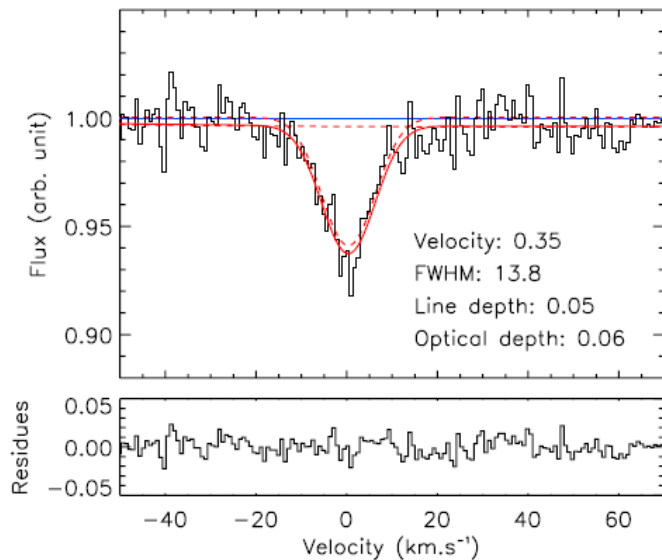


Observation 2 / Observation 1

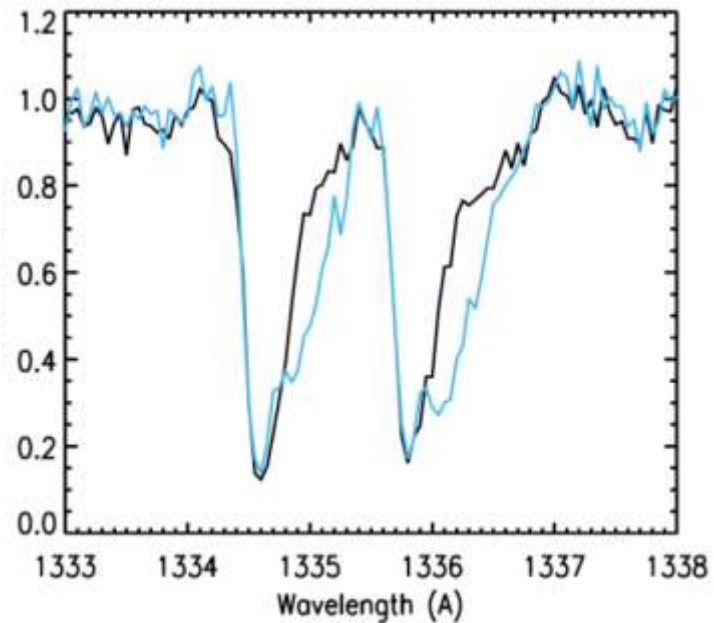
- Absorptions variables de  $\text{C}^+$  et  $\text{C}^{++}$
- Vitesses radiales supérieures à 100  $\text{km/s}$
- Sur-abondances de carbone

# Exocomètes de HD 172555

- Découvert dans les archives de l'ESO (Harps)
- Détection de 4 transits simultanément dans les 2 raies de CaII
- Détection de transits spectroscopiques du carbone C++



Ionised calcium  
(Harps, Kiefer et al. 2014)



Ionised carbon  
(Hubble, Grady et al. 2018)

# Détection d'exocomètes

Comète = petit corps avec une signature d'évaporation (*sublimation de volatiles sur des corps en orbites excentriques*)

→ Des petits corps extrasolaires peuvent être détectés quand ils deviennent des comètes

Détection de la coma et/ou de la queue cométaire (plusieurs millions de km)

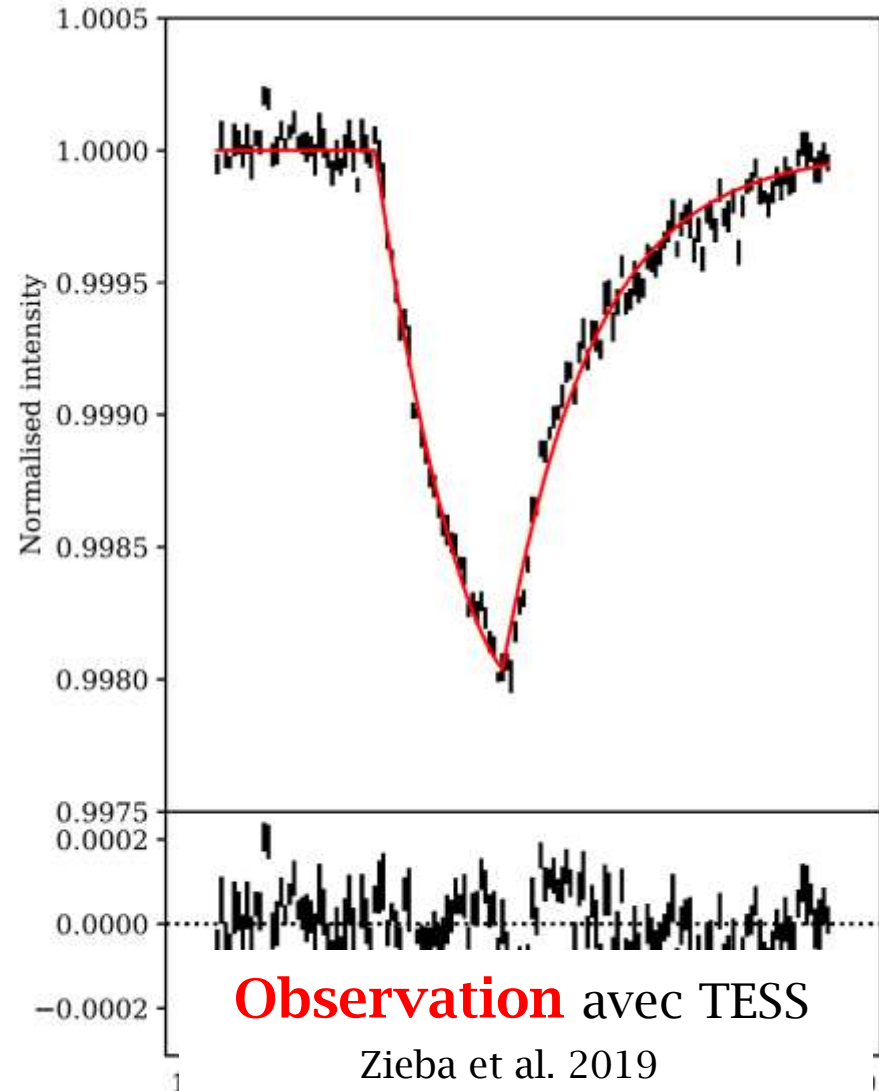
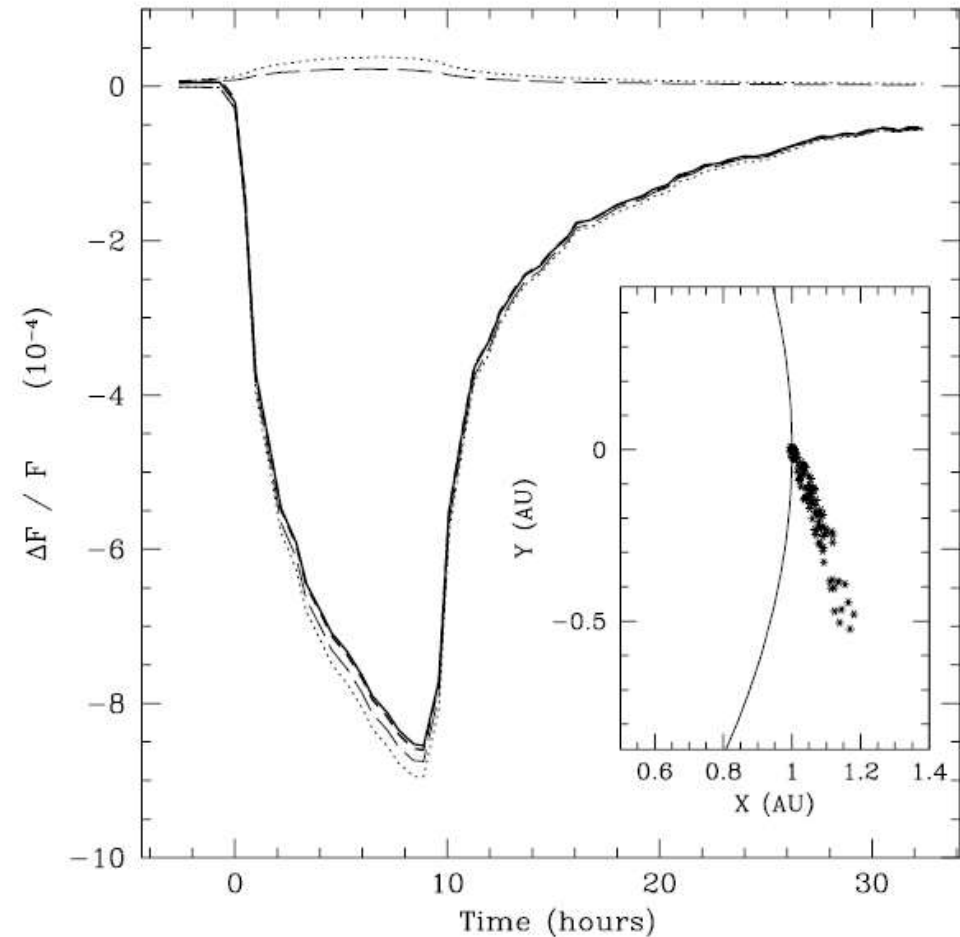
**grâce au transit**

Deux composantes: **la coma gazeuse** (spectroscopie)  
**la queue poussiéreuse** (photométrie)





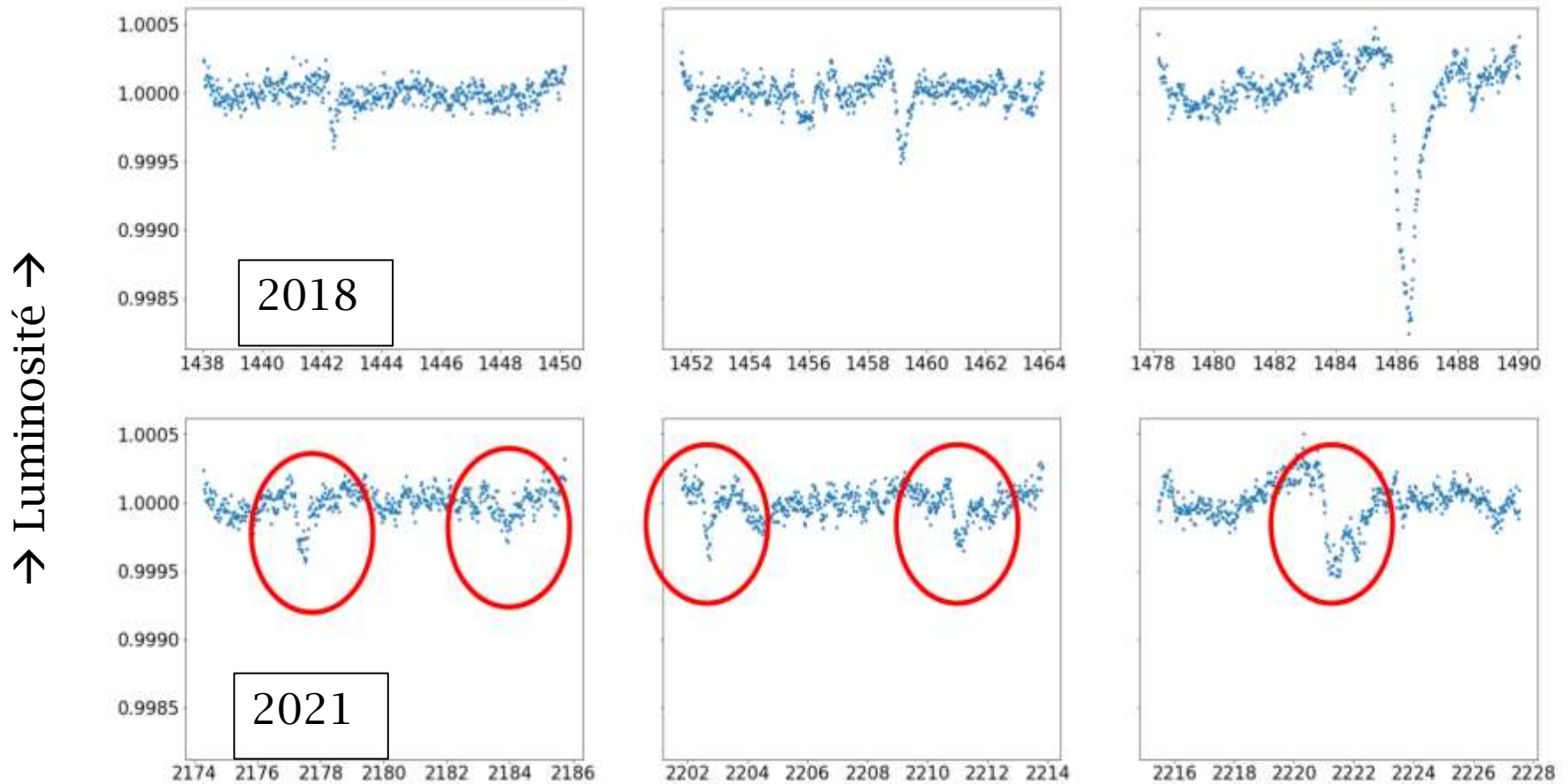
# Détection photométrique d'exocomètes dans le système de $\beta$ Pictoris



~~Simulation~~ avec  $P = 2 \cdot 10^6$  kg/s et  $q = 1$  ua  
Lecavelier, Vidal-Madjar, Ferlet 1999

**Observation** avec TESS  
Zieba et al. 2019

# Nouvelles exocomètes dans $\beta$ Pic avec TESS

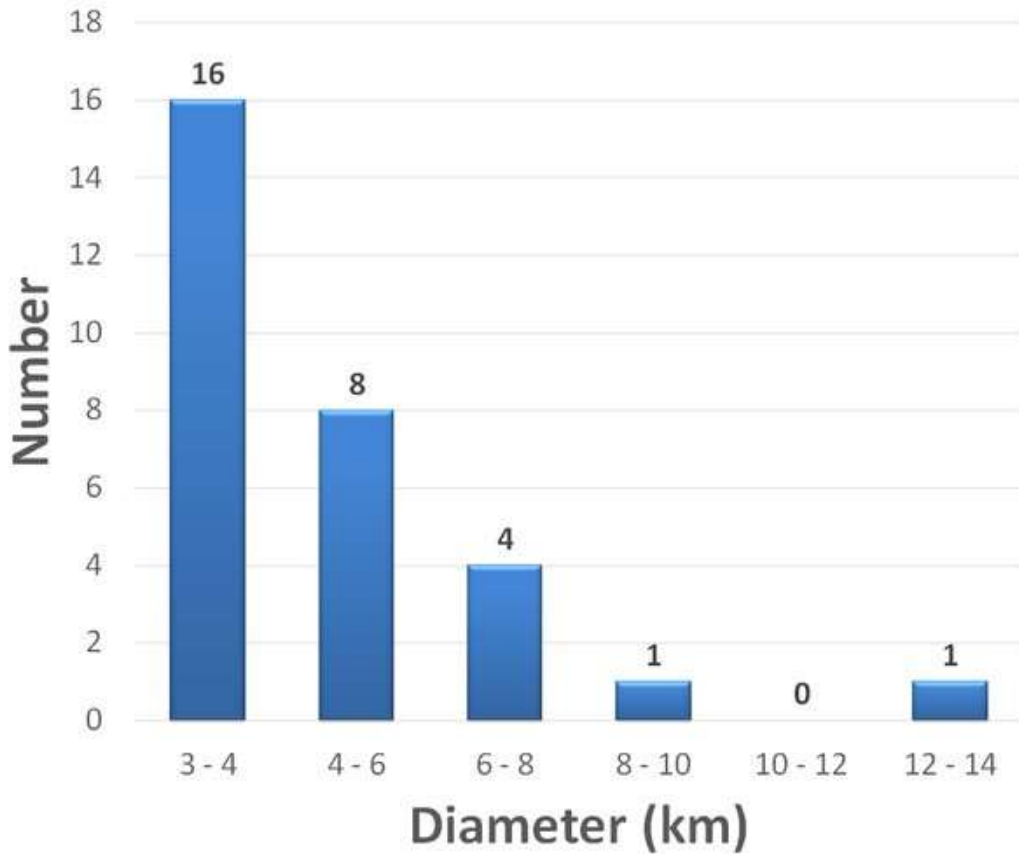


Détection de 27 exocomètes pendant 165 jours d'observation

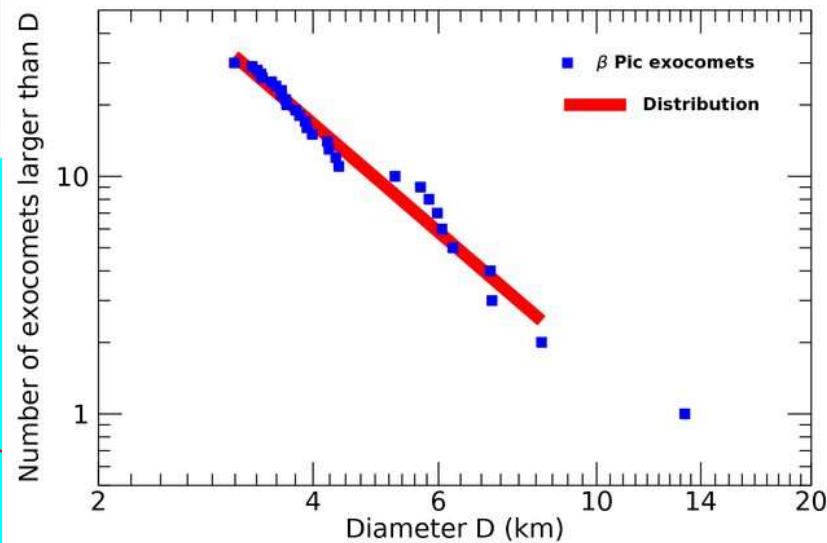
→ Distribution en taille des comètes

Lecavelier et al. 2021

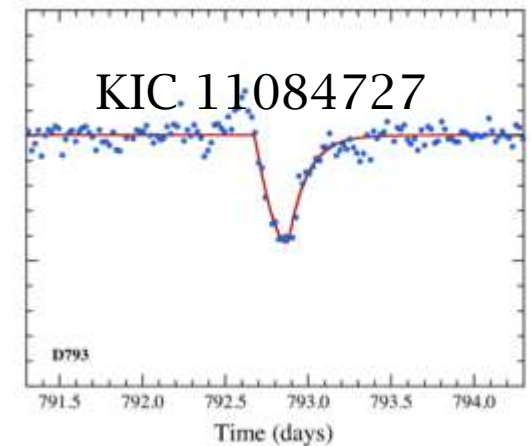
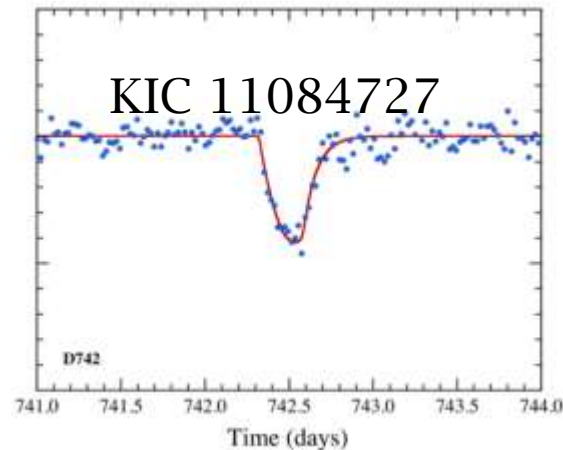
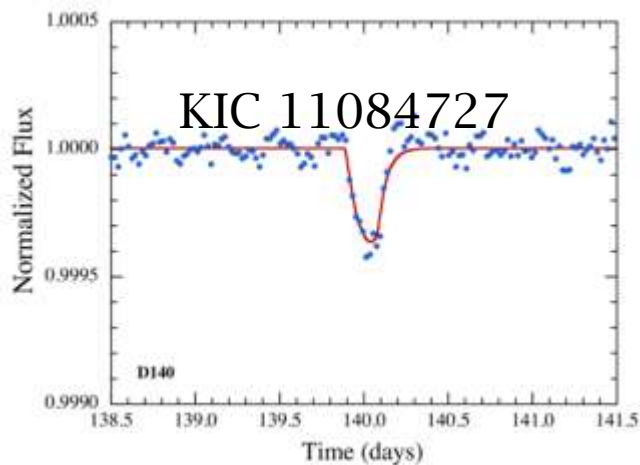
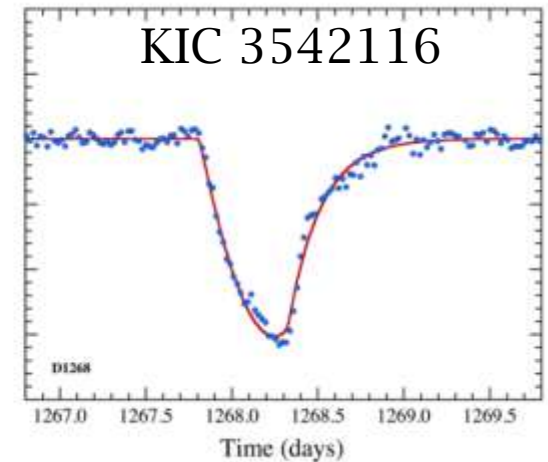
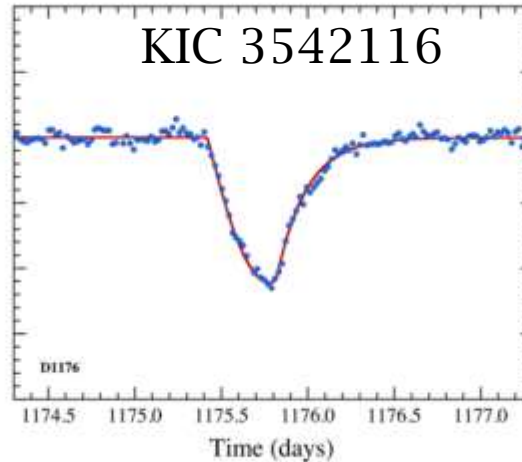
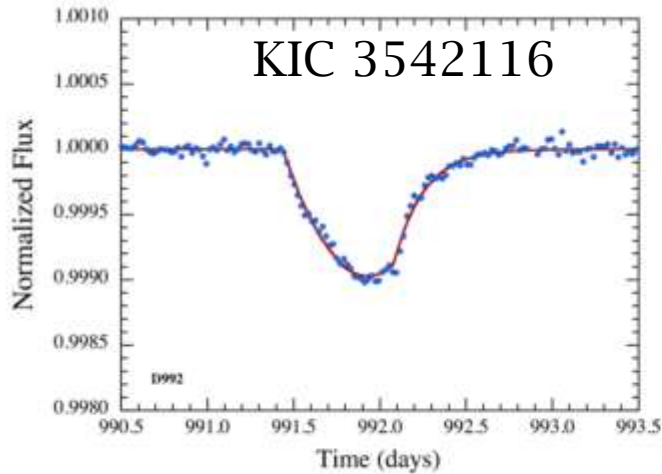
Number of exocomets  
as a function of the diameter



Caractéristique d'une population  
de corps produite par  
collision/fragmentation

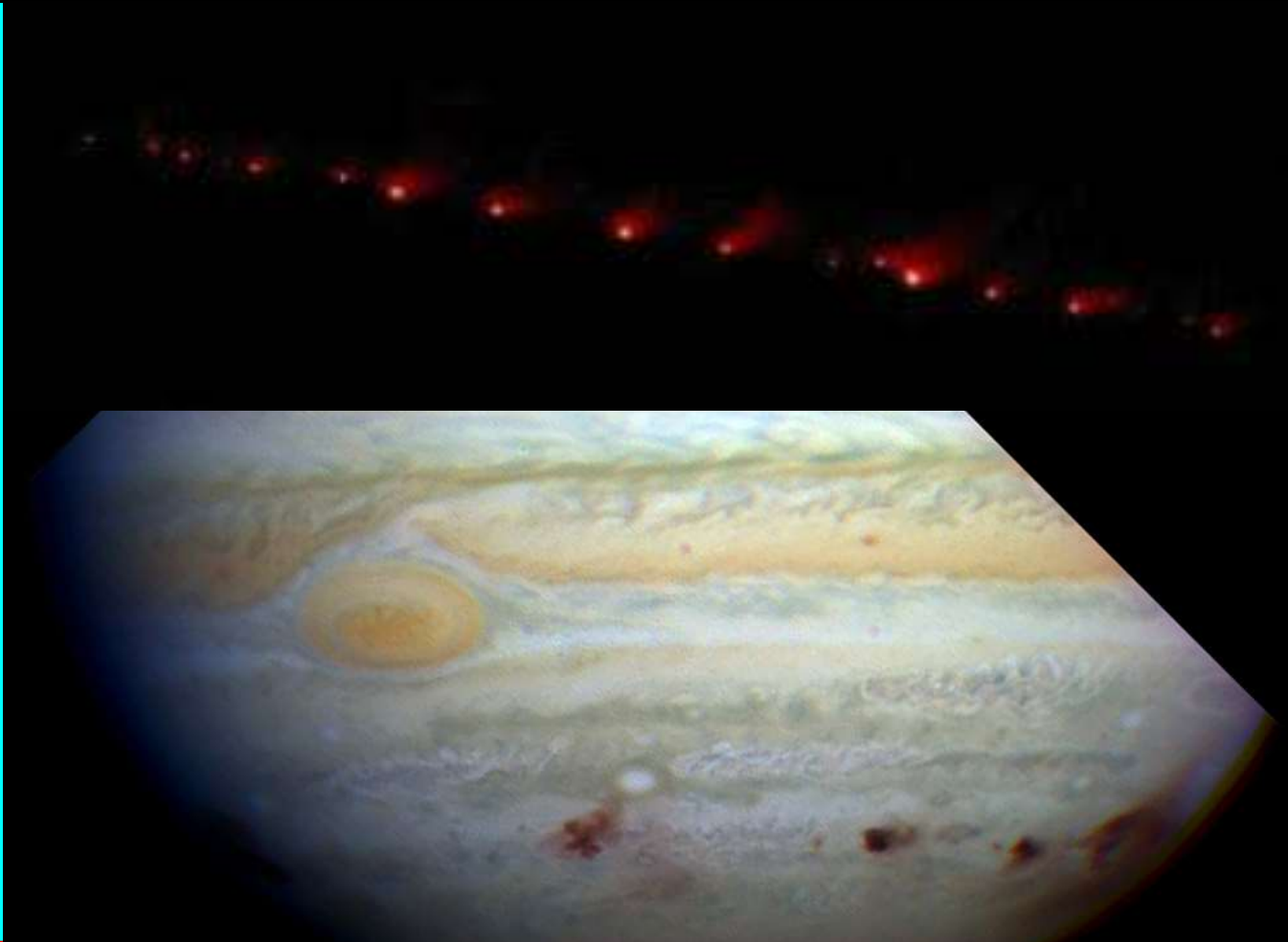


# Détection d'exocomètes avec Kepler





# Transit d'un chapelet d'exocomètes devant l'étoile KIC 8462852

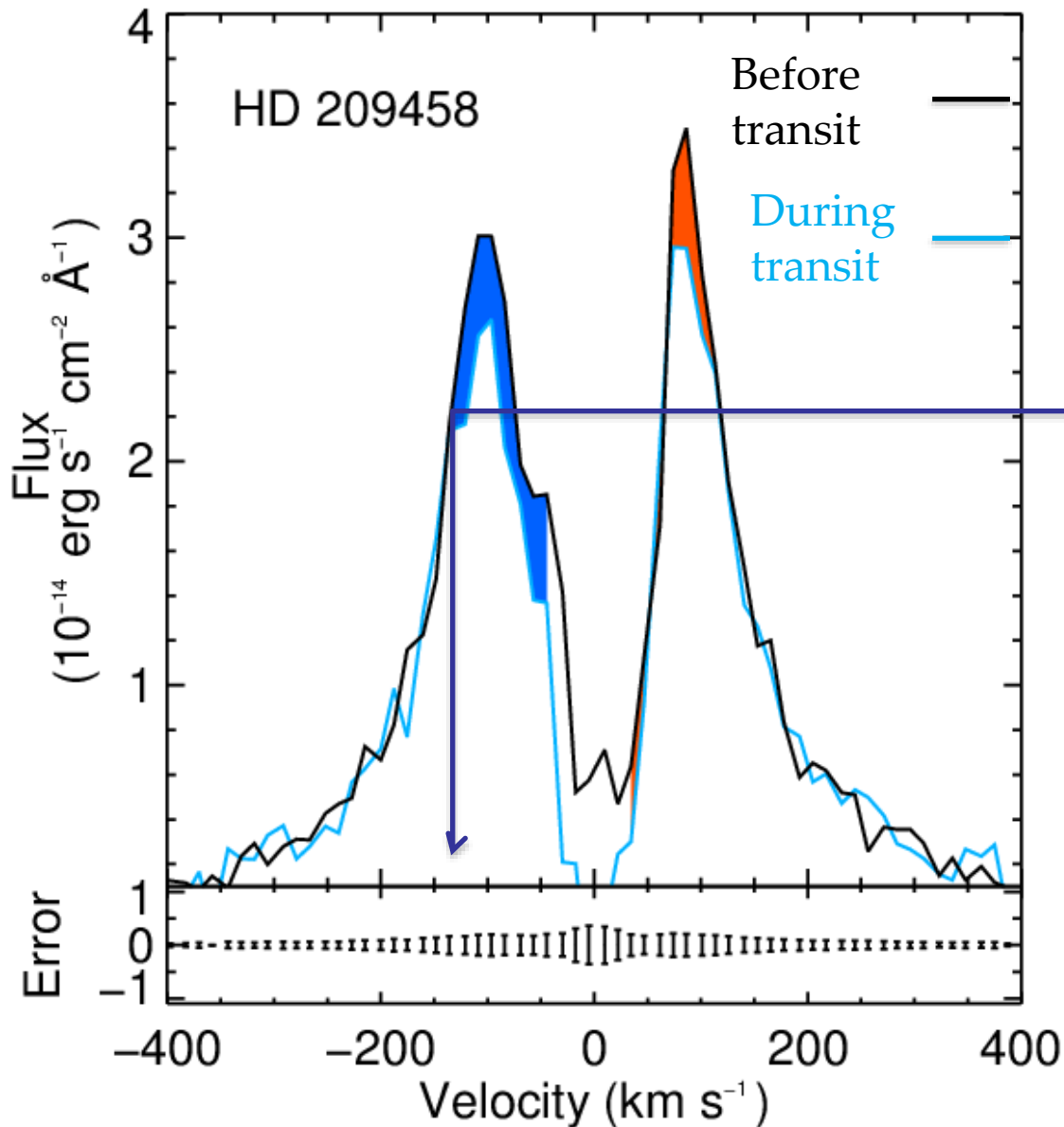


16 - 22 juillet 1994

Kiefer et al. 2017

**MERCI**

# Evaporation de HD 209458b



## Absorption HI Lyman- $\alpha$

*profondeur* :  $9.8 \pm 1.8\%$

➤ HI au-delà du lobe de Roche

*vitesse* : [-130km/s ; - 40km/s]

➤ HI au-delà de la vitesse d'échappement

**Evaporation**  
 **$\sim 10^9 - 10^{11}$  g/s**

# 1<sup>ère</sup> détection du carbone et de l'oxygène

